



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.  
Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

Análisis de ciclo de vida y eficiencia energética del  
proceso de producción de bioetanol de sorgo dulce,  
cultivado en el Estado de Yucatán

Tesis que presenta:  
IAI. Patricia Aguilar Sánchez

En opción al título de  
Maestro en Ciencias en Energía Renovable

Mérida, Yucatán, Enero de 2016



## AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., por brindarme la oportunidad de pertenecer a su equipo de estudiantes de posgrado y por formarme como profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por existir y por otorgarme la beca número 292470.

Al Dr. Luis Felipe Barahona Pérez, gracias por la oportunidad de trabajar con Usted, por la confianza brindada, por sus observaciones y comentarios, pero sobre todo por creer en mí y en este trabajo de investigación.

Al Dr. Donny V. Ponce Marbán por el apoyo y consejos que contribuyeron en este trabajo de tesis.

Al Dr. Juan Carlos Chavarría Hernández por las aportaciones, comentarios tan valiosos a este trabajo y por su sincera amistad.

A la Dra. Ingrid Rodríguez Buenfil por sus valiosos comentarios aportados a este trabajo.

Al Dr. Julio C. Sacramento Rivero, gracias por la entera confianza al permitirme trabajar en las instalaciones de la UADY y por sus comentarios que enriquecieron esta investigación.

Al M.C. Freddy S. Navarro Pineda, mi agradecimiento más sincero a ti que me apoyaste en toda la simulación de mi tesis, eres un gran profesional y un excelente ser humano, mil gracias por todos los conocimientos que compartiste humildemente.

Al M.C. Harvey Andrés Mílquez por la ayuda brindada en mis balances de materia y energía, gracias por haber estado siempre y apoyarme, eres un gran amigo que me llevo en el corazón.

Al Dr. Javier O. Mijangos Cortés y al M.C. Igor L. Peniche Ruíz por el tiempo brindado, dándome asesoramiento en la parte agrícola de mi trabajo, gracias por su disponibilidad y amabilidad.

Al Dr. Carlos A. García Bustamante y Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada que formaron parte de mi comité revisor y por las valiosas aportaciones a este trabajo.

A los Doctores que compartieron sus conocimientos en las aulas de clase y que contribuyeron siempre de manera positiva a mi formación profesional, mil gracias.

Al INIFAP, que siempre me ha brindado la oportunidad de crecer profesionalmente, gracias por el apoyo y la confianza al permitirme estudiar un posgrado en la institución de mi preferencia.

Al Dr. Vicente E. Vega Murillo y al M.C. René C. Calderón Robles que siempre estuvieron en la disposición de apoyarme para realizar mis estudios de maestría y por las facilidades para lograrlo.

A mis compañeros del C.E. San Martinito que han creído en mí, que siempre me han dado su apoyo profesional, que han estado en las buenas y en las malas, pero sobre todo por brindarme su amistad, gracias.

Samantha, Marco A., Edgar, Giovanni, Silvano, Rubí y Emmy, fue hermoso compartir buenos momentos como compañeros, les agradezco los comentarios y sugerencias que me hicieron para mejorar este trabajo de tesis. Se quedan en mí como una parte muy importante de esta grandiosa etapa. Siempre deseándoles éxito.

Vianney, Yaret, Anel, Rayo, Ricardo y José, gracias por contribuir a grandes momentos de risoterapia, por sus consejos y apoyo en este trabajo, e indudablemente por su hermosa amistad. Fue grandioso conocerlos.

Halsen Iván, gracias por la sencillez de tus consejos hacía mi trabajo y por demostrarme una amistad sincera junto con María.

A mis amigos de la Unidad de Materiales, especialmente a Marco, Oscar, Juanito, Gloria y Alex, que siempre estuvieron apoyándome y alentándome para concluir mi trabajo de tesis.

*A todas las personas que de alguna manera han estado pendientes de mí en este proceso, mi más sincero agradecimiento.*

## DEDICATORIA

### **A Dios.**

*Infinitas gracias por ponerme en el camino a muchas personas que contribuyeron a mi crecimiento tanto personal como profesional. Definitivamente tus tiempos son exactos y no te equivocas. Gracias por estar en todo...*

### **A mis padres.**

*Siempre me han enseñado a luchar por lo que quiero, siempre han estado conmigo, apoyándome incondicionalmente; siempre me han amado. Por tanto que me han enseñado y dado, les dedico este trabajo de tesis a ti Bárbara y Sotero, gracias por haberme acompañado en esta etapa de mi vida. ¡Los Amo mucho!*

### **A mi hermana.**

*Mi artista favorita, por estar conmigo, por hacerme reír y enojar (jajaja), tú también eres una gran guerrera y te admiro por eso, sabes que me encanta lo que haces y como lo haces. Te quiero mucho Bety.*

### **A mis amigos.**

*Mi hermanita postiza Yuliana, gracias querida amiga por haber estado apoyándome de lejos, por estar pendiente y por alentarme a seguir adelante. Es inspirador la manera en como luchas por lo que quieres, te adoro loca\_perdida.*

*Karen, no tienes idea de cuan agradecida estoy con Dios porque te cruzaste en mi camino el primer día de escuela, gracias por compartir desvelos, aventuras, viajes, consejos y más. Eres una excelente chica en todos los aspectos. Te quiero Karencita.*

*Lilia y Enrique, gracias por abrirme las puertas de su casa al llegar a Mérida, son muy importantes para mis padres y entiendo el por qué, pues son unas excelentes personas. Gracias por hacerme participe de su familia, por su apoyo y cariño, tanto a Ustedes como a Cathy, Enrique y Abel.*

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ABREVIATURAS Y DEFINICIONES.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT .....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
ANTECEDENTES.....	3
1.1 La Bioenergía en México.....	5
1.2 El bioetanol.....	6
1.3 Sorgo dulce como materia prima para producir bioetanol .....	7
Potencialidad del sorgo dulce en México .....	10
1.4 Evaluación ambiental y energética de la producción de bioetanol.....	13
1.4.1. Evaluación de impactos potenciales .....	18
1.5 Datos experimentales en los que se basó el trabajo de investigación.....	19
1.5.1 Fase Agrícola.....	20
1.5.2 Fase Industrial .....	22
1.6 Justificación .....	24
1.7 Hipótesis.....	24
1.8 Objetivos.....	25
1.8.1 Objetivo general.....	25
1.8.2 Objetivos específicos .....	25
CAPITULO II.....	26
2.1 Análisis de Ciclo de Vida.....	26
2.2 Balances de materia y energía.....	27
2.2.1 Planteamiento de escenarios .....	27
2.2.2 Límites del sistema .....	28
2.3 Evaluación energética.....	36
2.3.1 Demanda Acumulada de Energía .....	36
2.3.2 Razón de energía fósil .....	36
2.4 Evaluación ambiental.....	37
2.4.1 Emisiones generadas en la fase agrícola.....	37

2.4.2 Emisiones generadas en la fase industrial .....	38
2.4.3 Impactos ambientales potenciales de ciclo de vida .....	38
2.5 Mitigación de gases de efecto invernadero .....	39
CAPITULO III.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
3.1 Balances de materia y energía.....	41
3.2 Demanda acumulada de energía .....	49
3.3 Razón de energía fósil (REF).....	52
3.4 Impactos ambientales .....	54
3.4.1 Emisiones generadas en la etapa agrícola.....	54
3.4.2 Emisiones generadas en la etapa industrial .....	56
3.4.3 Impactos ambientales potenciales por categoría.....	57
3.5 Mitigación de gases de efecto invernadero .....	63
CONCLUSIONES .....	66
PERSPECTIVAS .....	68
<b>REFERENCIAS</b> .....	70
ANEXOS.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción mundial de etanol por país o región [31].	7
Tabla 2. Parámetros comparativos de la caña de azúcar y sorgo dulce [24,33,36-38].	8
Tabla 3. Resumen de algunos trabajos referentes a estudios de ACV para el bioetanol a partir de caña de azúcar y sorgo dulce.	16
Tabla 4. Categoría de impactos potenciales propuestos por la metodología CML [41, 52, 77-79].	19
Tabla 5. Información de rendimientos agrícolas e insumos (unidad/ciclo de cultivo) [37].	21
Tabla 6. Parámetros utilizados en la producción de bioetanol, a partir de jugo	22
Tabla 7. Parámetros utilizados en la producción de bioetanol, a partir del bagazo	23
Tabla 8. Condiciones de operación para los procesos de destilación y deshidratación en Aspen Plus.	30
Tabla 9. Datos de análisis elemental y poder calorífico del bagazo, requeridos en Aspen Plus.	32
Tabla 10. Condiciones de operación para los procesos de cogeneración en Aspen Plus.	34
Tabla 11. Categorías de impacto e indicadores, según la metodología elegida.	39
Tabla 12. Especificaciones de los equipos para tratar la biomasa antes de procesarla.	45
Tabla 13. Inventario de ciclo de vida para la producción de bioetanol.	47
Tabla 14. Razón de energía fósil para cada escenario de producción de etanol a partir de sorgo dulce	52



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales consumidores de petróleo, 2012 (miles de barriles diarios) [5].....	3
Figura 2. Estimación del consumo mundial de las energías renovables según .....	4
Figura 3. Vías de uso para los diferentes subproductos del sorgo dulce [45,46]. .....	10
Figura 4. Mapa de potencial productivo de sorgo dulce en México [49]. .....	11
Figura 5. Concentrado de los estados con potencial productivo de sorgo dulce [48]. .....	12
Figura 6. Porcentaje de sacarosa, glucosa y fructosa de diferentes variedades de sorgo dulce [34]. .....	12
Figura 7. Etapas de un análisis de ciclo de Vida según la Norma ISO 14040:2006, [52]..	14
Figura 8. Distribución de los trabajos de investigación.....	20
Figura 9. Distribución aérea de la biomasa del sorgo dulce [37]. .....	21
Figura 10. Diagrama general para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida.....	26
Figura 11. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol a partir del jugo de sorgo dulce- escenario EI. ....	28
Figura 12. Proceso de destilación y deshidratación para los escenarios, simulados por el programa Aspen Plus. ....	29
Figura 13. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol y combustión a partir de sorgo dulce, para los escenarios EII y EIII. ....	31
Figura 14. Diagrama del proceso de combustión en una planta de vapor simple.....	33
Figura 15. Diagrama del proceso de combustión en un modelo de ciclo combinado.....	33
Figura 16. Diagrama jerárquico del proceso de destilación y cogeneración. ....	33
Figura 17. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce para el escenario EIV.....	35
Figura 18. Comparación entre la cadena de producción del sistema estudiado y referencia fósiles. ....	40
Figura 19. Insumos agrícolas extrapolados a la densidad de plantación y rendimientos de sorgo dulce. ....	41
Figura 20. Balance de materia y energía para el escenario EI. ....	42
Figura 21. Balance de materia y energía para el escenario EII. ....	43
Figura 22. Balance de materia y energía para el escenario EIII. ....	44
Figura 23. Balance de materia y energía para el escenario EIV.....	45
Figura 24. Porcentaje de energía requerida por los equipos. ....	46
Figura 25. Requerimiento de Energía no renovable para los diferentes escenarios.....	49

Figura 26. Demanda acumulada de energía (DAE) para el escenario EI. ....	50
Figura 27. Demanda acumulada de energía para los escenarios EII y EIII .....	51
Figura 28. Demanda acumulada de energía para el escenario EIV .....	51
Figura 29. Emisiones correspondientes a la etapa agrícola .....	55
Figura 30. Emisiones generadas por MJ de etanol obtenido para cada escenario.....	58
Figura 31. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EI. ....	59
Figura 32. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EII. ....	61
Figura 33. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EIII. ....	62
Figura 34. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EIV.....	63
Figura 35. Valores de reducción de emisiones de GEI de los escenarios, tomando un sistema de referencia fósil. ....	64

## ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

<b>ACV</b>	Análisis de ciclo de vida
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>eq</b>	Equivalente
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Equivalencia en dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) referente a los seis gases de efecto invernadero
<b>PRRA</b>	Potencial de reducción de recursos abióticos
<b>PE</b>	Potencial de eutrofización
<b>PCG</b>	Potencial de calentamiento global
<b>PRCO</b>	Potencial de reducción de capa de ozono
<b>PTH</b>	Potencial de toxicidad humana
<b>PEAF</b>	Potencial de ecotoxicidad de agua fresca
<b>PEAM</b>	Potencial de ecotoxicidad de agua marina
<b>PET</b>	Potencial de ecotoxicidad terrestre
<b>POF</b>	Potencial de oxidación fotoquímica
<b>CUS</b>	Cambio de uso de suelo
<b>EI</b>	Escenario I- Bioetanol a partir de jugo
<b>EII</b>	Escenario II- Bioetanol a partir de jugo y producción de electricidad con planta de vapor simple a partir del bagazo del tallo
<b>EIII</b>	Escenario III- Bioetanol a partir de jugo y producción de electricidad con planta de ciclo combinado a partir del bagazo del tallo
<b>EIV</b>	Escenario IV- Bioetanol a partir de jugo y bagazo
<b>RSB</b>	Roundtable for sustainable biomaterials
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>NRTL</b>	Non-random two-liquid model
<b>PM<sub>10</sub></b>	Partículas como ceniza, polvo, hollín, etc., dispersos en la atmósfera (diámetro menor a 10µm)
<b>SFS</b>	Sacarificación y fermentación simultánea
<b>DAE</b>	Demanda acumulada de energía
<b>REF</b>	Razón de energía fósil o eficiencia energética
<b>CML-2001</b>	Base de datos que contienen factores de caracterización para el análisis de ciclo de vida, elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos
<b>ART</b>	Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station

## RESUMEN

El sorgo dulce es catalogado como la materia prima ideal para la producción de bioetanol, principalmente porque no es un cultivo que compite con los alimentos en México. Sin embargo es fundamental identificar si el proceso es energéticamente y ambientalmente viable. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es el estudio que evalúa los impactos ambientales potenciales de un producto o proceso durante su ciclo de vida. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia energética y los impactos ambientales potenciales del bioetanol, a partir del sorgo dulce cultivado en Yucatán, mediante un ACV; para esto se consideraron las siguientes etapas: cultivo y cosecha del sorgo dulce, transporte de biomasa hacia la planta industrial, la transformación de biomasa a etanol, la quema del biocombustible y la gestión de desperdicios industriales. Se analizaron cuatro escenarios, el primer escenario (EI) asume solo la producción de bioetanol a partir del jugo de sorgo dulce; el segundo escenario (EII) contempla la producción de bioetanol a partir de jugo de sorgo dulce, así como la generación de calor y electricidad a partir del bagazo con una planta de vapor simple, mientras que el tercer escenario (EIII), contempla la producción de bioetanol a partir de jugo de sorgo dulce y la cogeneración con el bagazo en una planta de vapor de ciclo combinado; y finalmente el escenario número cuatro (EIV) plantea la producción de bioetanol a partir del jugo y del bagazo de sorgo dulce. Los cálculos del ACV se realizaron en el programa SimaPro 8.0, teniendo en cuenta los impactos ambientales base de la metodología CML 2 baseline 2000 V2.05; y la eficiencia energética por medio de la metodología Cumulative Energy Demand V1.08, con el mismo programa. Los resultados indicaron que para los escenarios EII y EIII no fue necesario el requerimiento extra de electricidad fósil, ya que producen más energía que la consumida en su proceso y para el EI, éste consume más energía de la que genera. El EIV mostró una excesiva demanda de energía, debido a que el pretratamiento del bagazo es un proceso energéticamente intensivo. Asimismo, el EIV fue el escenario con más desventajas en cuanto a su desempeño ambiental principalmente en la fase de transformación de biomasa a bioetanol, con emisiones arriba del 90% en la mayoría de sus categorías. El EIII, resultó ser la opción más eficiente desde el punto de vista energético y ambiental para establecer una planta de producción de bioetanol a partir de sorgo dulce en el Estado de Yucatán, ya que presentó una razón de energía fósil (REF) de  $1.89 \text{ MJ}_{\text{bioetanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$ , y en cuanto a los valores de reducción de GEI con respecto a los fósiles (gasolina y electricidad convencional) presentó reducciones mayores al 60% en la mayoría de sus categorías.

## ABSTRACT

Sweet sorghum is listed as the ideal raw material for the production of bioethanol, because it is a crop that does not compete with food in Mexico. However, it is essential to identify whether the process is energy and environmentally viable. Life Cycle Analysis (LCA) is a technique that assesses the potential environmental impacts of a product or process during its life cycle. The goal of this work was to evaluate the potential environmental impacts and the energy efficiency of bioethanol production from sweet sorghum cultivated in Yucatán, México through a LCA considering the following steps: cultivation and harvesting of sweet sorghum, biomass transport to plant facilities, transformation of biomass into bioethanol, use of the biofuel and industrial waste management. Four scenarios were evaluated; first scenario (EI) comprises only bioethanol production from sweet sorghum stalk juice; the second scenario (EII) assumes bioethanol production from stalk juice and co-generation (heat and electricity) from dry stalk biomass in a single steam process. The third scenario (EIII) uses a combined cycle facility for cogeneration and the fourth scenario (EIV) comprises bioethanol production from stalk juice and dry stalk biomass (lignocellulosic bioethanol). LCA was carried out with SimaPro 8.0, taking into account the basic environmental impacts from CML 2 baseline 2000 V2.05 methodology; and the energy efficiency was calculated with Cumulative Energy Demand V1.08 methodology, with the same program. The results indicated that scenarios EII y EIII are fossil energy independent as they produce more energy than consumed and EI consumes more energy than generated from the use of bioethanol. Scenario EIV showed an excessive energy demand due to a high energy demanding pretreatment step. Also, scenario EIV presented disadvantages on environmental performance, mainly in the processing stage of biomass to bioethanol, with emissions above 90% in most categories. Scenario EIII was the most efficient option (energy and environmental impact) to develop a bioethanol production plant from sweet sorghum in the Yucatán region. This scenario showed a REF value of 1.89 MJbioethanol/MJfossil and 60% reduction in GHG emissions from fossil energy (gasoline and electricity).

## INTRODUCCIÓN

México cuenta con yacimientos de petróleo, sin embargo enfrenta desafíos importantes debido a la disminución de sus reservas, por esta razón el Gobierno Federal, promueve diversas Leyes con la finalidad de incrementar la seguridad energética y disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, participando en acuerdos internacionales sobre medio ambiente, los cuales han llamado la atención y motivado a crear y promover fuentes alternativas como las Energías Renovables (ER).

Las ER son más limpias y pueden considerarse amigables con el medio ambiente, tal como en el caso de la energía hidráulica, solar y eólica, o que pueden provenir de fuentes que se producen en forma sostenible, como es el caso de la biomasa [1]. La bioenergía se origina principalmente de la biomasa y ésta incluye un rango muy amplio de productos que pueden utilizarse con fines energéticos, desde combustibles sólidos como la leña, carbón vegetal o residuos agrícolas que pueden quemarse directamente o gasificarse para producir calor y electricidad, cultivos como el sorgo dulce y plantas oleaginosas de las que se pueden obtener biocombustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel, hasta los residuos municipales y de granjas, de los que se puede obtener productos como el biogás.

El bioetanol es el biocombustible que hasta el momento podría considerarse con un potencial positivo para fines de transporte, como un complemento a la gasolina, ya que se valora como respetuoso con el medio ambiente [1].

Para que el uso del bioetanol sea masivo y se beneficie a la sociedad, éste debe entrar en el triángulo de sustentabilidad, es decir, contar con un análisis de ciclo de vida (ACV) y con una eficiencia energética positivos ya que hasta el día de hoy diversos estudios reportan que ningún biocombustible lo cumple, al menos que se combine con la generación de otro tipo de bioenergía, como es la cogeneración u otros productos [2]. Por ello, es fundamental cuantificar los beneficios ambientales que pueden alcanzarse con estas tecnologías y un ACV es una herramienta adecuada para realizar este tipo de estudios. La importancia de esta herramienta es que en cualquier sistema, nos permite la evaluación de los efectos ambientales derivados de las actividades humanas al generar un producto o servicio desde la extracción y adquisición de la materia prima, la producción

y consumo de energía, hasta la disposición final o reciclaje de éste, es decir la recopilación y evaluación de las entradas y salidas, así como el potencial de impactos ambientales que se generan, permitiéndonos visualizar alternativas de mejora.

En el Centro de Investigación Científica de Yucatán AC, se han desarrollado, a nivel laboratorio, tres estudios para establecer un proceso de producción de bioetanol a partir del tallo completo de sorgo dulce. Los datos generados pueden servir de base para realizar estudios de factibilidad económica e impacto ambiental.

En este trabajo, se extrapolaron los datos obtenidos en los estudios previos y se llevaron a cabo simulaciones para conformar una base de datos que contiene la información de las diferentes entradas y salidas del proceso de producción de etanol de sorgo dulce. Seguidamente, se realizó un análisis de eficiencia energética y evaluación de los impactos ambientales potenciales por medio de un ACV bajo diferentes escenarios de producción y poder evaluar cuál es el más viable desde el punto de vista energético y ambiental.

# CAPITULO I

## ANTECEDENTES

El Banco Mundial reportó en 2013 que México y Gran Bretaña son los dos países que cuentan con la “Ley de Cambio Climático”. En el caso de México, fue expedida en el año 2012, y su objetivo principal no es solo hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, sino también la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Promover de manera gradual la sustitución del uso y consumo de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, así como la generación de electricidad a través del uso de fuentes renovables de energía son compromisos que podrán mejorar las reducciones que se planean, y uno de los objetivos para México es disminuir las emisiones hasta un 30% para el año 2020 y un 50% para el año 2050 [4].

Se ha reportado que el consumo mundial de petróleo crudo promedio en 2012 fue de 89,774 mbd, valor 1% mayor a 2011. Las regiones con mayor demanda fueron Asia Pacífico y Norteamérica, con participaciones de 33.2 y 25.7%, respectivamente. Estados Unidos consumió 20.7% del total mundial, China el 11.4%, mientras que México registró un consumo equivalente a 2.3% (Figura 1) [5].

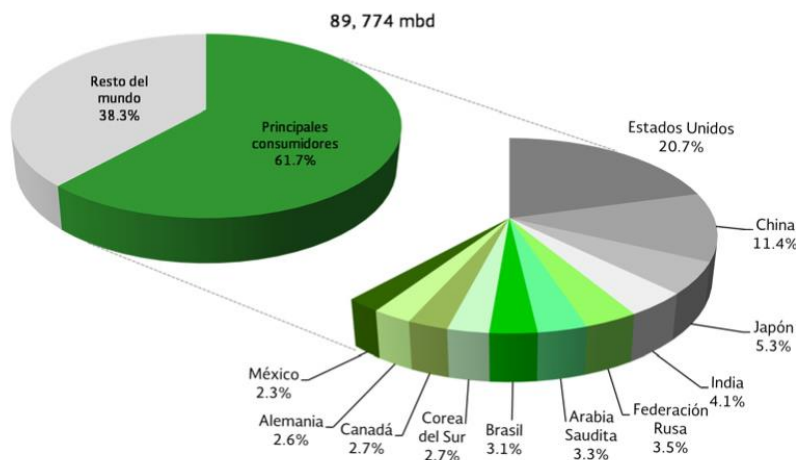


Figura 1. Principales consumidores de petróleo, 2012 (miles de barriles diarios) [5].



La Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés), hizo evidente el reducido consumo mundial de las energías renovables, partiendo de que tan sólo un 8.5% de biomasa tradicional es usada, y de ese valor, tan solo el 0.7% es transformada en biocombustibles. Estos datos se pueden identificar en la figura 2 [6].

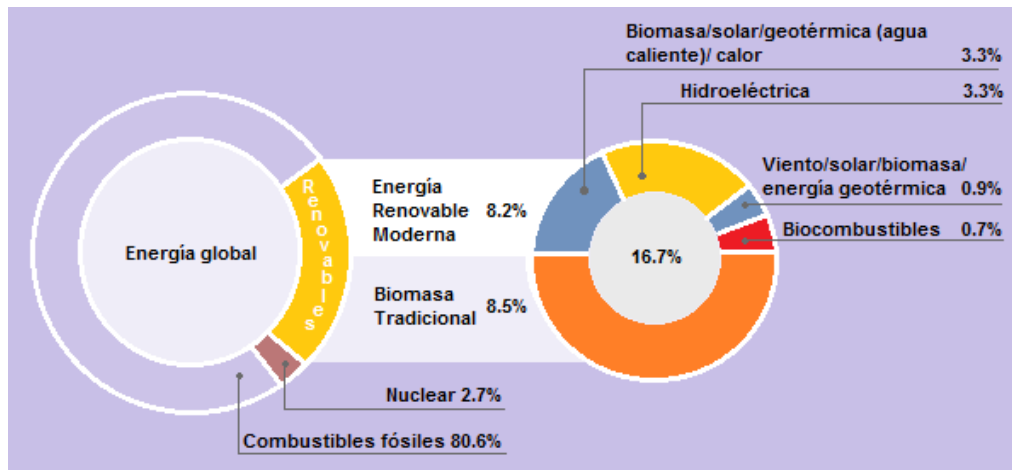


Figura 2. Estimación del consumo mundial de las energías renovables según la Agencia Internacional de Energía (IEA), 2012 [6].

Por otro lado, debido a las políticas mundiales para mitigar el cambio climático, promover las economías de energía verde, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente el dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] y el metano [CH<sub>4</sub>]) y promover la seguridad energética, la investigación sobre nuevos procesos de producción de biocombustibles que sean sustentables se ha incrementado a una velocidad sin precedente [7,8]. Además de la necesidad de reducir la dependencia energética del petróleo extranjero, principalmente en los países como Estados Unidos y China [9,10].

Actualmente, existe una gama de tecnologías bioenergéticas y las técnicas varían considerablemente. La utilización de la biomasa como materia prima es una alternativa prometedora a los recursos fósiles y a través de una variedad de procesos, éstas se pueden utilizar directamente para producir electricidad o calor, o bien para producir combustibles gaseosos, líquidos, o sólidos [11,12].

## 1.1 La Bioenergía en México

México cuenta con una amplia gama de recursos renovables para fines energéticos, sin embargo, no significa que la producción de biocombustibles sea técnica y económicamente viable [13]. A nivel mundial, México se destaca por ser uno de los países con las metas más ambiciosas en materia de generación de fuentes no fósiles. La Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, establece que para el año 2024 la participación de las fuentes no fósiles en la generación de electricidad sea de un 35%, esto en pro de la sustentabilidad a largo plazo del sector energético. Adicionalmente, se encuentra la importancia de la mitigación de los impactos negativos que la producción y el consumo de energéticos puedan tener sobre la salud y el medio ambiente, ya que la tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionados con la energía no biogénica de México es de 4.3%, y es considerada como una de las más altas del mundo [10,14-16].

Es por esto que la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos emitida en el año 2008, hace referencia en promover la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, actividades forestales, producción de algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país [16].

La representación de la bioenergía a nivel internacional es de solo un 10% del consumo de energía total y se estima que para el año 2035, podrían contribuir en un 25% de la energía requerida en el mundo. La bioenergía en México abastece el 5% del consumo de energía primaria, lo que correspondió a 432 PJ en el año 2008; utilizando principalmente la leña, bagazo de caña y el carbón vegetal, este último según el Banco Mundial con un 90.1% de participación. Se cree que un buen manejo de la bioenergía, de manera sustentable, representaría grandes ventajas desde los puntos de vista socioeconómico y ambiental, debido a que crearía sinergias entre los sectores agrícolas forestales, energéticos, industriales, ambientales y sociales, promoviendo así un desarrollo sustentable a través de la creación de empleos e inversiones. Como prueba, habrá que tomar la experiencia de Brasil, Europa y otros países líderes en Bioenergéticos, que requirieron una serie de estrategias con visión a largo plazo, y el apoyo de políticas y recursos públicos [17,18].

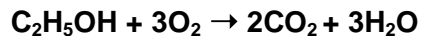
## 1.2 El bioetanol

El bioetanol se obtiene de la fermentación alcohólica de los azúcares libres en la biomasa o provenientes de la hidrólisis de polisacáridos como el almidón y la celulosa. En este proceso la glucosa se convierte en etanol, bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). Su utilización como combustible tiene lugar mediante la reacción exotérmica cuando se quema, produciendo CO<sub>2</sub> y agua. Las reacciones químicas de transformación de azúcar en etanol y la combustión del mismo, tienen la siguiente estequiometría [19]:

- Reacción para la producción de bioetanol



- Reacción de combustión del bioetanol



A pesar de que el principal producto es el bioetanol, recientemente el concepto de biorefinería se hace presente como un camino hacia la sustentabilidad; esto es incrementando el uso de los subproductos obtenidos en el proceso de la producción de bioetanol, ya que se puede obtener: CO<sub>2</sub> (utilizado en la industria), energía para calefacción, electricidad, biometanol, lignina y bioplásticos [20].

Son diversas las investigaciones acerca de los biocombustibles. Particularmente, para el bioetanol, existe abundante información sobre las materias primas con características adecuadas para su proceso, tecnologías, estimaciones económicas, ambientales y energéticas que le confieren un buen potencial como biocombustible para hacer sinergia con los fósiles [8,9,19,21-28].

La producción mundial de los biocombustibles entre 1980 y 2005 se incrementó en un orden de magnitud de 4.4 a 50.1 millones de litros al año [8], siendo el bioetanol uno de los biocombustibles que se ha promovido con más énfasis, debido a su potencial para ser empleado en el transporte, poder ser mezclado con la gasolina o para producir el etil terbutil éter (ETBE) que sirve como aditivo para la gasolina, además de que este se produce a partir de productos agrícolas, a diferencia del metil terbutil éter (MTBE), el cual se produce a partir del metanol, producto derivado del gas natural [20,29,30].

El bioetanol es uno de los biocombustibles dominantes para el sector del transporte, principalmente en países como Brasil, Estados Unidos y China. Brasil, es hasta el momento el país latinoamericano sobresaliente en cuanto a la producción de bioetanol ocupando el segundo lugar después de Estados Unidos, como se observa en la tabla 1 [31].

Tabla 1. Producción mundial de etanol por país o región [31].

<b>Producción mundial de Etanol por país o región (millones de galones)</b>					
<b>País</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
USA	13,298.00	13,948.00	13,300	13,300	14,300
Brasil	6,921.54	5,573.24	5,577	6,267	6,190
Europa	1,208.58	1,167.64	1,179	1,371	1,445
China	541.55	554.76	555	696	635
Canadá	356.63	462.30	449	523	510
Resto del mundo	984.61	698.15	752	1,272	1,490
<b>Total</b>	<b>23,310.91</b>	<b>22,404.09</b>	<b>21,812</b>	<b>23,429</b>	<b>24,570</b>

### 1.3 Sorgo dulce como materia prima para producir bioetanol

El sorgo (*Sorghum* spp.) es un género botánico, perteneciente a la familia de las gramíneas, del que existen unas 20 especies. Es el quinto cereal más importante y se cultiva en varias partes del mundo, por ejemplo en África, Europa, América (EE.UU, Centroamérica y Suramérica) y Asia Meridional. En Latinoamérica y el Caribe, se cultiva en Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Uruguay y Venezuela. Es una planta que se adapta bien al crecimiento en tierras áridas o semiáridas cálidas, es resistente al calor, la salinidad y las inundaciones [32-34]. Se considera una planta de metabolismo C<sub>4</sub>, anual y de rápido crecimiento. Aunque es una hierba perenne, en los trópicos puede cosecharse varias veces al año, debido a su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales [33,35,36]. Tiene una altura aproximada de 1 a 3 metros dependiendo de la subespecie.

El sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) representa una cosecha similar a la caña de azúcar, con una acumulación similar de sacarosa, pero con una mayor estabilidad agronómica, además de ser un cultivo anual con estaciones de crecimiento típicas de 3 -5 meses difiriendo de la caña de azúcar, que tiene un período de cosecha entre los 9 a 12 meses. En la tabla 2 se puede observar las diferencias que existen entre estos cultivos,

de acuerdo a varios autores [34,36]. El contenido de azúcares totales del jugo de sorgo dulce y el jugo de caña de azúcar, pueden llegar a ser semejantes, sin embargo, la caña de azúcar cuenta con el porcentaje de sacarosa más alto (90%) en relación a la glucosa (4%) y fructosa (6%) [24].

Tabla 2. Parámetros comparativos de la caña de azúcar y sorgo dulce [24,33,36-38].

<b>Características</b>	<b>Sorgo dulce</b>	<b>Caña de azúcar</b>
Tiempo de cosecha	3-5 meses	9-12 meses
Suelos	Todo tipo de suelos drenados	Buen crecimiento en suelos drenados
Requerimientos hídricos	Tolerante a la sequía. Requerimiento de lluvias moderadas (450-500 mm, con óptimo entre 600-700 mm)	Requiere de 2 a 4 veces más requerimiento hídrico.
Manejo del cultivo	Poco uso de fertilizantes, poco complejo ante plagas y enfermedades; de fácil manejo	Requiere de grandes cuidados
Rotación de cultivos	Pueden implementarse cultivos posteriormente, preservando la degradación de los suelos.	No se considera intercalado o rotación de cultivos, propiciando la degradación de suelos por compactación.
Rendimiento de tallo por hectárea	45-69 t	70-80 t
Rendimiento de azúcares	6-8 t·ha <sup>-1</sup>	7-8 t·ha <sup>-1</sup>
Producción de etanol (jugo)	2650- 4750 L·ha <sup>-1</sup>	3,000-5,000 L·ha <sup>-1</sup>
Bagazo	El bagazo obtenido, es de alto valor biológico, rico en micronutrientes, que puede ser utilizado para alimentación animal, así como para la cogeneración de energía.	

A diferencia del sorgo grano, cuyo mayor contenido de material fermentable se encuentra en el almidón del grano, el sorgo dulce se caracteriza por su alto contenido de azúcares fermentables en el tallo. De este modo, el etanol de sorgo dulce se obtiene particularmente a partir de la trituración de los tallos y de la posterior destilación del jugo obtenido.

Por lo tanto, dentro de las grandes ventajas que lo hacen atractivo al sorgo dulce para su uso como materia prima tenemos que:

- Posee un rendimiento agrícola relativamente alto, superior a los obtenidos de los cereales. Su rendimiento agrícola varía considerablemente, dependiendo de las variedades utilizadas, ubicación (suelo, agua, clima, plagas y enfermedades), insumos (requiere menor necesidad de nitrógeno, fertilizantes y agua en comparación con los cultivos más tradicionales como el maíz) [39] y prácticas de producción. Puede presentar una productividad total acumulada de entre 60 toneladas en tierras de temporal y 100 toneladas en tierras de riego de sorgo verde por hectárea [40]. En general, puede producir entre 45 a 75 ton·ha<sup>-1</sup>, según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (2010), y esto coincide con la literatura, donde se mencionan rendimientos de 54-69 ton·ha<sup>-1</sup> [36,38]
- Dentro de las características más significativas, y que lo hace atractivo para producción de etanol, es su contenido de carbohidratos solubles en el tallo con un rango de 43.6 a 58.2% así como su contenido de celulosa insoluble y hemicelulosa con un contenido de 22.6- 47.8% [26].
- El sorgo dulce se ha considerado como el biocombustible de generación 1.5, es decir, aquel producido por tecnologías convencionales, pero con materias primas que no compiten con la producción de alimentos [41].
- El sorgo, es una cosecha multipropósito, ya que puede ser utilizado para la alimentación del ganado, la alimentación humana y la producción de azúcar y energía [33,42]. Es considerado como el único cultivo que proporciona grano y tallo, y éstos pueden ser utilizados como sustrato para la producción de azúcar, alcohol, jarabe, forraje, combustible, techos, cercas o papel [39,43,44]
- Otra característica a favor del cultivo de sorgo dulce es que es un cultivo anual y debido a su ciclo corto permite establecer sistemas de rotación de cultivos o cultivos dobles bajo condiciones climáticas adecuadas [19].
- Además de que se estima que la producción de etanol a partir de bagazo de sorgo dulce podría ser más atractivo en términos de balances de energía y emisiones de gases de efecto invernadero que otros cultivos [43].

En cuanto a los limitantes de esta gramínea, puede mencionarse la poca resistencia de ésta una vez cosechada, por lo cual no puede ser almacenada durante mucho tiempo. Asimismo el jugo del sorgo no puede ser almacenado con facilidad, generando el problema de la estacionalidad. Lo recomendable según la literatura, sería contar con una planta de producción que opere justo después de la cosecha y que en esta se puedan aprovechar los diferentes subproductos (Figura 3), que incluso pueden destinarse a fines energéticos, ya que solo operarían pocos meses al año, aunque esto dificulta primordialmente su factibilidad económica [19,38,45-47]

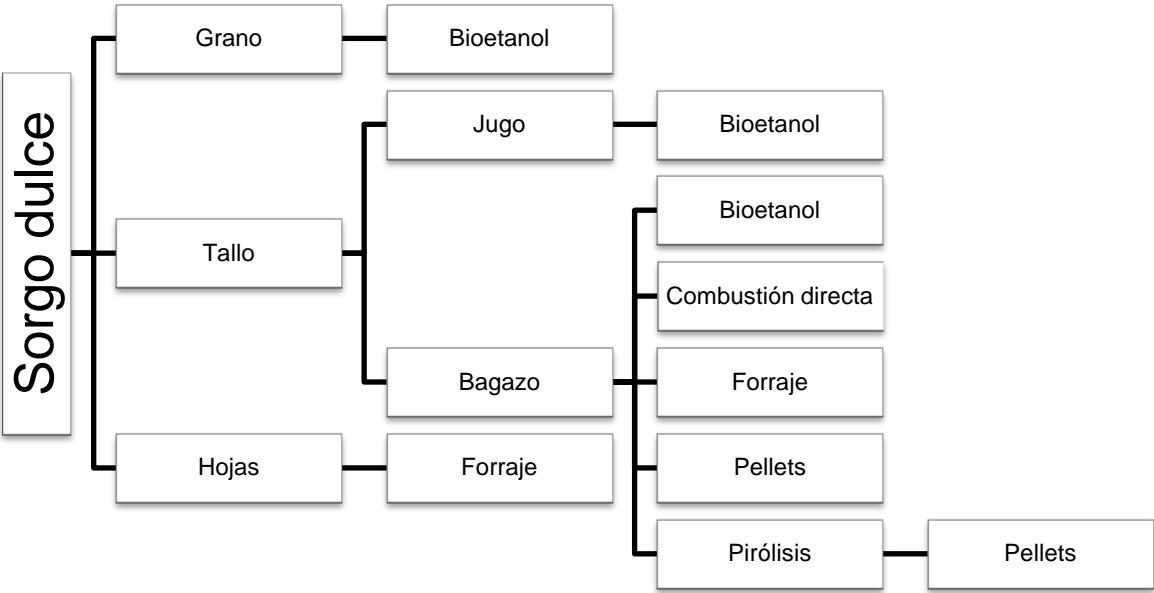


Figura 3. Vías de uso para los diferentes subproductos del sorgo dulce [45,46].

**Potencialidad del sorgo dulce en México**

La información y experiencia sobre sorgo dulce en México es pobre; pero por su similitud en el procesamiento a la caña de azúcar, lo hace viable para la producción de bioetanol [40]. La SAGARPA, en el año 2008, publicó un mapa de los estados con potencial productivo en diferentes cultivos con fines bioenergéticos (Figura 4). Uno de ellos es el sorgo dulce con potencial productivo representado con el color rosa, donde se puede ver que los Estados con mayor potencial son Tamaulipas, Sinaloa y Michoacán, sin embargo el estado de Yucatán cuenta también con potencial productivo de sorgo dulce. Por otro lado, el INIFAP, reportó en el 2012 un potencial productivo de sorgo dulce para todos los

estados de la República Mexicana, haciendo evidente que Tamaulipas y Sinaloa continúan en el liderazgo de este cultivo con 558,868 y 465,981 ha respectivamente (Figura 5) [48,49].



Figura 4. Mapa de potencial productivo de sorgo dulce en México [49].

Debido a la abundancia genética de este cultivo, su alta eficiencia fotosintética y la adaptación a factores abióticos (clima y características nutricionales del suelo), se considera a esta gramínea como un cultivo que puede ser aprovechado en Yucatán y que puede competir en cuanto a su rendimiento con Estados con mayor productividad, como Sinaloa y Tamaulipas, considerando que sea mecanizada la preparación del terreno, la cosecha y que cuente con un sistema de riego eléctrico [37].



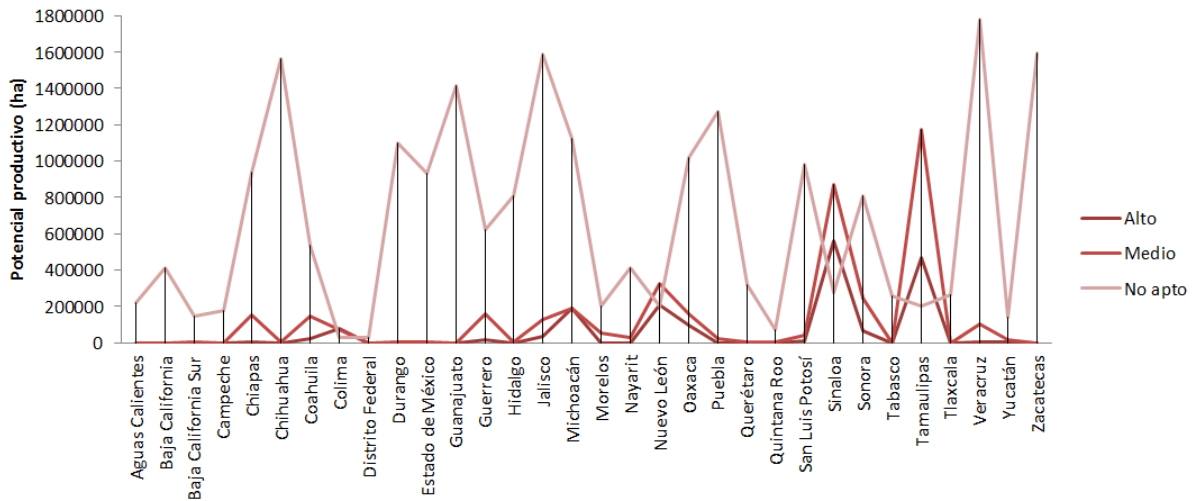


Figura 5. Concentrado de los estados con potencial productivo de sorgo dulce [48].

El tallo de sorgo dulce se compone principalmente de un 73% de contenido de agua. El jugo está compuesto de sacarosa, glucosa y fructosa, y las proporciones dependen de la variedad, de las condiciones del cultivo y la cosecha. En la figura 6 se muestran los porcentajes de sacarosa, glucosa y fructosa determinados en un conjunto de sorgos dulces cosechados en el sur de Estados Unidos y en el Noreste de México según lo reportado por Dávila *et al.* [34].

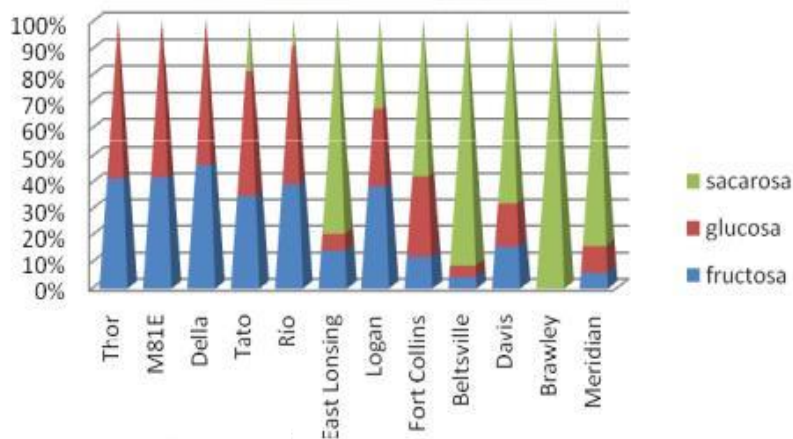


Figura 6. Porcentaje de sacarosa, glucosa y fructosa de diferentes variedades de sorgo dulce [34].

Existen proyectos de plantas de bioetanol de sorgo dulce (jugo) a nivel piloto en los Estados de Veracruz y Tamaulipas. Por parte del gobierno y con los apoyos de la Reforma Energética se presenta mayor interés en cultivos que no compitan con los

alimentos, como el cultivo de sorgo dulce, al que se le apuesta grandes beneficios para la obtención del bioetanol, principalmente por su riqueza en azúcares contenidos en el tallo. Prueba de esto es la planta piloto en el estado de Veracruz, inaugurada en Septiembre 2015, la cual tendrá como materia prima al sorgo dulce, donde obtendrán de 100 a 300 litros de etanol anhidro por día. Tamaulipas es otro estado que le ha apostado a este cultivo, y donde posiblemente en unos años más estén dando valor agregado a su producción de sorgo dulce, a través de la empresa Bioenergéticos Mexicanos S.A.P.I. de C.V. [50,51].

#### **1.4 Evaluación ambiental y energética de la producción de bioetanol.**

Comprobar que tan positivo o negativo pueden ser sus balances, tanto de materia como de energía, además de identificar si es amigable con el medio ambiente se hace necesario para cualquier cultivo que pretenda ser viable para la producción de bioenergía. Para esto existen herramientas que pueden estimar si el proceso es sustentable antes de implementarlo, permitiendo escalarlo a nivel piloto o industrial. El denominado “análisis de ciclo de vida (ACV)”, considera el ciclo de un proceso o un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento, reciclado, hasta su disposición final; es decir, “de la cuna a la tumba” [52,53]. El ACV trata los aspectos e impactos ambientales del producto en un sistema y la parte económica y social generalmente queda fuera del alcance, sin embargo pueden combinarse para un análisis más profundo [52].

Un estudio de ACV es muy amplio en comparación con las evaluaciones de impacto ambiental, los cuales se hacen *in situ* y corresponderían a todos los impactos de una planta o de un producto real [54]. Para llevarlo a cabo no existe un estatuto, sin embargo la Norma ISO 14040:2006 sugiere cuatro etapas que se visualizan en la figura 7 y que pueden ayudar como una guía, según los límites que se deseen estudiar [52]. Actualmente existe en México una norma (NMX-SSA-14040-IMNC-2008) que establece los requisitos para realizar un ACV, la cual está basada en la norma ISO.

La dimensión ambiental, comprende a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el rendimiento ecológico global, la conservación de los recursos energéticos, el uso del agua, efecto sobre la calidad del suelo, conservación de la biodiversidad, el uso de

productos químicos así como también la práctica de tala y quema. Estos objetivos relacionados entre sí deben estar en equilibrio para que los biocombustibles se consideren sostenibles y renovables [55].

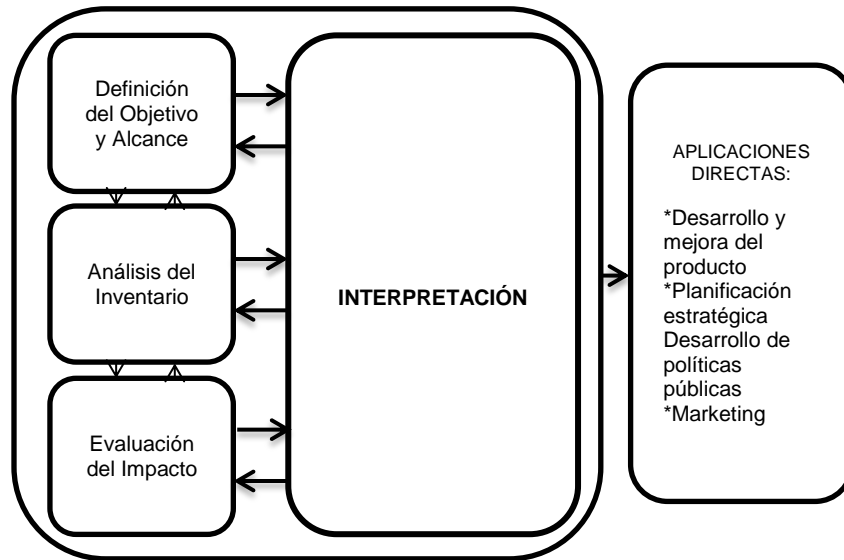


Figura 7. Etapas de un análisis de ciclo de Vida según la Norma ISO 14040:2006, [52].

En lo que respecta a la parte energética, para cualquier análisis de bioenergía es importante distinguir entre un combustible fósil y no fósil, ya que es primordial ver la verdadera naturaleza renovable de los biocombustibles. La razón de energía fósil (REF) o eficiencia energética es uno de los indicadores para este tipo de evaluaciones; así pues, se dice que si la relación de energía fósil (REF) es “menor que uno” el combustible es considerado como “no renovable”, ya que hay mayor incorporación de energía fósil para poder producir el biocombustible. Si el valor de REF es “mayor a uno” se considera “parcialmente renovable”, en teoría un combustible renovable total no tendría ningún requisito de energía fósil [56,57].

Los efectos ambientales a nivel internacional, para el caso de las mezclas de bioetanol, deberán, en promedio, presentar emisiones de gas de efecto invernadero en su ciclo de vida inferior al valor de referencia de los combustibles fósiles. Por ejemplo la Mesa Redonda de biomateriales (RSB, por sus siglas en inglés) especifica que el biocombustible debe mitigar hasta un 50%, la Directiva de Energías Renovables (RED, por sus siglas en inglés) un 35% y finalmente la Norma de Combustible Renovable (RFS, por sus siglas en inglés) un 25% con respecto a la gasolina [58].

En la literatura se puede encontrar una amplia información [2,12,41,52-56, 59-64] acerca de los orígenes y de cómo se lleva a cabo el estudio de ciclo de vida de cualquier proceso o producto. También se ha demostrado que dependiendo de la materia prima, las condiciones de cultivo y las condiciones bajo las cuales opere la biorefinería, los balances de materia y energía pueden llegar a ser negativos; es decir, se puede requerir más energía y emitir más GEI al obtener estos biocombustibles, que por su uso [12].

En México, los cultivos más propicios para la generación de bioetanol son la caña de azúcar y el sorgo dulce. Además de su similitud en sus características físicas [24,36]. Los trabajos con mayor relevancia sobre ACV de la producción de etanol a partir de estos cultivos se presentan en la tabla 3. En ella se pueden observar las investigaciones realizadas en diferentes países, destacando que para México existe hasta el momento un estudio de ACV para el bioetanol a partir de la caña de azúcar, manejando diferentes escenarios de aprovechamiento de los productos de esta materia prima. Asimismo se puede observar que los países que sobresalen en estos estudios son Estados Unidos de América y China. Todos tienen en común evaluar la eficiencia energética del bioetanol y los impactos ambientales potenciales, que conllevan a visualizar un panorama de cómo se comportan los biocombustibles en cuanto a estos dos temas.

Tabla 3. Resumen de algunos trabajos referentes a estudios de ACV para el bioetanol a partir de caña de azúcar y sorgo dulce.

Materia prima	País	Objetivo	Observaciones	Autores
Caña	Argentina	Calcula los saldos de una industria de la caña de azúcar en Tucumán involucrando los GEI y energía producida. Las operaciones que intervienen en el ciclo de producción de azúcar y etanol se tomaron en cuenta.	Los principales factores que influyen en los saldos fueron los fertilizantes, gas y nitrógeno utilizados en la etapa agrícola, gas natural consumido por el molino de azúcar y la quema de la caña.	Acreche y Valeiro, 2013 [65]
	Argentina	Desarrollar un ACV del etanol a partir de caña de azúcar en Tucumán, evaluando los impactos ambientales potenciales.	La agricultura es el subsistema que muestra el impacto más alto en casi todas las categorías debido al consumo de combustibles fósiles.	Amores <i>et al.</i> , 2013 [66]
	Colombia	Comparar diferentes alternativas tecnológicas para biocombustibles de segunda generación usando la metodología ACV.	El pretratamiento de la biomasa con explosión de vapor generó menores impactos ambientales comparados con el pretratamiento ácido y con solventes orgánicos.	Avila <i>et al.</i> , 2012 [67]
	Brasil	Cuantificar los impactos potenciales de la generación de energía de bagazo de caña de azúcar.	El ozono fotoquímico, la toxicidad humana (a través de los suelos) y la eutrofización fueron los impactos potenciales, causados por las técnicas de cosecha de caña de azúcar actuales.	Lopes <i>et al.</i> , 2012 [68]
	México	Estimar las emisiones de GEI y balances de energía para la futura expansión de la producción de etanol de caña de azúcar en México con una corriente y cuatro posibles modalidades	Las variables que afectan el medio ambiente son causadas por el cambio de uso de suelo, emisiones al aire y suelo por el uso de fertilizantes y la quema de la caña, además del uso de los combustibles fósiles en la fase industrial. Las emisiones más bajas de CO <sub>2e</sub> fueron para el etanol producido a partir de jugo directo, junto con la quema de bagazo para la generación de electricidad.	García <i>et al.</i> , 2011 [57]
	Cuba	Identificar y cuantificar los aspectos que tienen el mayor impacto ambiental de cuatro alternativas para el uso de los subproductos y residuos derivados del proceso de la caña de azúcar.	La etapa agrícola muestra el mayor impacto debido al uso de la tierra, el consumo de combustible y agroquímicos. En la etapa industrial, la cogeneración con bagazo muestra impactos por la emisión de partículas pequeñas a la atmósfera.	Contreras <i>et al.</i> , 2009 [69]
	Brasil	Realizar un ACV que sea comparativo con la gasolina y el etanol como combustible.	El caso base (etanol y cogeneración con bagazo) representa la menor cantidad de emisiones, pero no tan viable económicamente, en comparación con el escenario futuro (etanol con jugo y bagazo y cogeneración con residuos).	Luo <i>et al.</i> , 2009 [70]

MATERIA PRIMA	PAÍS	OBJETIVO	OBSERVACIONES	AUTORES
Sorgo dulce	Estados Unidos de América	Calcular el posible impacto ambiental de la producción de etanol a partir de sorgo dulce utilizando varias opciones de procesamiento.	De los tres escenarios planteados, la opción "centralizado" contribuyó con 62% en las emisiones de GEI y un aumento del 50% en el uso de energía no renovable en comparación con el etanol de maíz.	Olukoya <i>et al.</i> , 2015 [71]
	China	Evaluar la eficiencia energética e impactos ambientales de un sistema de producción de bioetanol que utiliza el tallo del sorgo dulce producido en terrenos salinos- alcalinos.	La producción de agroquímicos consume 76,58% de la energía fósil utilizada. La categoría con el mayor impacto es la eutrofización, seguido de acidificación, ecotoxicidad acuática, toxicidad humana y el calentamiento global. Las prácticas de gestión razonables para aliviar el estrés salino y la eficiencia al uso de agroquímicos puede mejorar la sostenibilidad ambiental.	Wang <i>et al.</i> , 2015 [72]
	Grecia	Comparar el sorgo dulce con el maíz en términos de GEI emitidos durante la fase de cultivo, así como en relación con la reducción de emisiones mediante la sustitución por bioetanol de la gasolina fósil.	Hay variedades de sorgo dulce que producen rendimientos más altos de bioetanol por hectárea junto con las emisiones más bajas durante la fase de cultivo y una mejor mitigación de GEI en comparación con el maíz.	Vlachos <i>et al.</i> , 2015 [73]
	Estados Unidos de América	Modelar y analizar por medio del proceso de descentralización la fase económica, ambiental y energética utilizando cinco escenarios de procesamiento.	Existen beneficios relacionados con el sistema de procesamiento descentralizado que se deben considerar en el desarrollo de cadenas sostenibles y eficaces para la producción de bioenergía, no sólo desde el punto de vista económico, también en términos de energía y ambientales.	Caffrey <i>et al.</i> , 2014 [47]
	China	Evaluar la eficiencia energética y el desempeño ambiental de la producción de bioetanol a partir del tallo de sorgo dulce en China.	Los resultados muestran que la relación de energía neta fue de 1,56. La toxicidad humana se identificó como el impacto más significativo (generación de vapor), seguido de la eutrofización (fertilizantes) y acidificación (generación de vapor). La reutilización de la vinaza como combustible para generar vapor mejora la eficiencia energética y el desempeño ambiental.	Wang <i>et al.</i> , 2014 [41]
	Estados Unidos de América	Evaluar el uso de energía en el ciclo de vida y las emisiones de GEI en la producción de bioetanol de sorgo en los EUA.	El etanol de sorgo dulce puede reducir las emisiones de GEI en 71 o 72% con o sin uso de vinaza como fertilizante agrícola, respectivamente. El etanol a base de sorgo forrajero puede lograr una reducción de emisiones de GEI del 49% cuando las plantas de etanol abastecen su demanda de energía con la cogeneración.	Cai <i>et al.</i> , 2013 [74]

## **1.4.1. Evaluación de impactos potenciales**

### **1.4.1.1 Cambio del uso del suelo**

Cada proceso de producción de biocombustibles inicia con el establecimiento de los cultivos y por lo tanto implica un cambio en el uso del suelo (CUS). Las emisiones referentes al cambio de uso del suelo serán el resultado de la reducción del contenido de carbono en la biomasa por encima del suelo, por debajo de la biomasa aérea, y el carbono orgánico en el suelo en las zonas necesarias para expandir el cultivo, esto suponiendo que el carbono perdido por CUS se emite en forma de CO<sub>2</sub> [57].

La práctica agrícola convencional se caracteriza por la labranza, lo que puede provocar la erosión del suelo. Según Farooq y Siddique [75], la labranza convencional ha hecho de la agricultura un importante contribuyente al calentamiento global a causa del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, primordialmente por el uso de combustible fósil, uso de fertilizantes químicos, etcétera [57].

### **1.4.1.2 Categorías de impacto potenciales**

La evaluación de los impactos ambientales debe estar igualmente asociada con todas las etapas de ciclo de vida de un producto y por eso es importante seleccionar un conjunto de categorías de impacto pertinentes para los estudios en bioenergía. Las áreas en cuanto a impacto al ambiente incluyen a la salud humana, salud de los ecosistemas, disponibilidad de los recursos y el ambiente generado por actividades antropogénicas. Para una evaluación de bioenergía a partir de biomasa, Iswanto y Heijungs [76], sugieren basarse en un conjunto completo de categorías de impacto, incluyendo el cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana y ecotoxicidad, acidificación, eutrofización, cambio de uso de suelo y agotamiento de los recursos abióticos. Es importante mencionar que si no se abordan impactos claves, cualquier trabajo de investigación podría generar información incompleta y poco fiable, por lo tanto estos impactos deben estar de acuerdo con el objetivo y alcance del estudio [59].

En la tabla 4 se aborda información acerca de las categorías de impacto potenciales, en este caso conforme la metodología del Instituto de Ciencias Medioambientales de la

Tabla 4. Categoría de impactos potenciales propuestos por la metodología CML [41, 52, 77-79].

Categoría de impacto	Unidades	Indicadores
<b>PRRA</b> , potencial de reducción de los recursos abióticos	kg Sb <sub>eq</sub>	El grupo de los recursos abióticos comprende los recursos naturales, incluidos los energéticos, que se consideran como "no vivos". Esto es el agotamiento del espacio físico en el que habitan los seres vivos (suelo, agua, humedad, temperatura, nutrientes, luz, etc.). El uso eficiente de estos recursos es un criterio importante para la sostenibilidad.
<b>PA</b> , potencial de acidificación	kg SO <sub>2eq</sub>	Indicador del fenómeno de la lluvia ácida. Emitido en forma de gas, debido a la generación de vapor en la combustión, cae al suelo en forma de lluvia ácida, causando posteriormente daños al suelo.
<b>PE</b> , potencial de eutrofización	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> <sub>eq</sub>	Indicador de la eutrofización de las aguas superficiales. La fase de cultivo contribuye principalmente a este impacto. Existe una descarga orgánica rica en nutrientes, lo que contribuye a la proliferación de algas, evitando la fotosíntesis de los sistemas acuáticos.
<b>PCG</b> , potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2eq</sub>	Indicador del efecto invernadero. La fase de cultivo e industrial contribuyen al PCG, emisiones generadas en la producción de los fertilizantes y por el uso de estos. Además de emisiones por la generación de vapor y electricidad.
<b>PRCO</b> , potencial de reducción de la capa de ozono	kg CFC-11 <sub>eq</sub>	Indicador de la formación de smog fotoquímico. El agotamiento de la capa de ozono se establece a partir de emisiones ricas en hidrocarburos, que contienen principalmente bromo, flúor y cloro, o CFC.
<b>PTH</b> , potencial de toxicidad humana; <b>PEAF</b> , potencial ecotoxicidad de agua fresca; <b>PEAM</b> , potencial ecotoxicidad de agua marina; <b>PET</b> , potencial ecotoxicidad terrestre.	kg 1,4-DCB <sub>eq</sub>	Emisiones de sustancias tóxicas. Se comparan un gran número de productos químicos que pueden contribuir con efectos negativos sobre la salud humana, la salud en un ecosistema acuático, marino y terrestre. Los principales contribuyentes son la generación de vapor y producción de agroquímicos para PTH, PEAM y PET. La pérdida de herbicidas contribuye para PEAF.
<b>POF</b> , potencial de oxidación fotoquímica.	kg C <sub>2</sub> H <sub>4eq</sub>	Asociado a la producción de las emisiones de compuestos orgánicos, debido principalmente a la fase de producción de bioetanol. Causando primordialmente daños a la salud.

### 1.5 Datos experimentales en los que se basó el trabajo de investigación

Se recopilaron los datos de trabajos de investigación realizados en el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. y que sirvieron para el desarrollo de esta tesis (Figura 8).



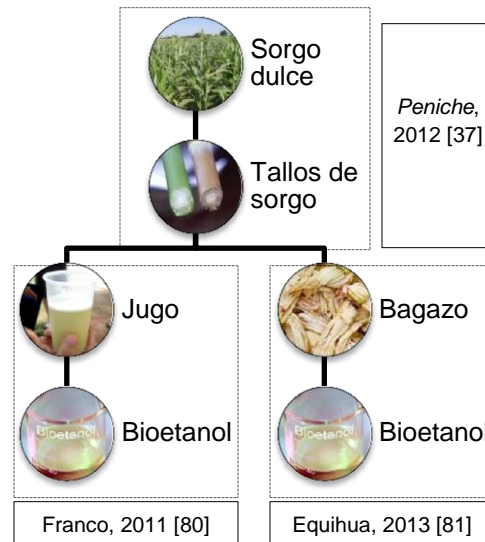


Figura 8. Distribución de los trabajos de investigación.

### 1.5.1 Fase Agrícola

El trabajo de investigación realizado por Peniche [37], contribuyó para llevar a cabo gran parte del balance agrícola.

#### 1.5.1.1 Área de estudio

El área de estudio se ubicó en las zonas donde primordialmente se han hecho pruebas experimentales del cultivo de sorgo dulce. Los lugares seleccionados se ubican al oriente de Yucatán, México, en los municipios de Tizimín y Buctzotz, específicamente en los ranchos de Santa Cruz y Gavilanes, respectivamente [37]. Los datos generados formaron parte de investigaciones previas por estudiantes del Centro de Investigación Científica de Yucatán AC, y estos se emplearon para la base de datos de este trabajo, además se consultó en la literatura para recopilar información más completa a nivel industrial.

#### 1.5.1.2 Requerimientos agrícolas y rendimiento de la biomasa

Los requerimientos de materia prima para el desarrollo de esta plantación de sorgo dulce, se tomó en cuenta una densidad de plantación de 70,000 plantas·ha<sup>-1</sup> y a partir de estos se extrapoló a las cantidades y volúmenes utilizados en este trabajo. Para la preparación y el cuidado se necesitaron los datos de pesticidas, fertilizantes, agua para riego; además

de los promedios de peso del tallo, porcentaje de materia seca, peso del bagazo por tallo y residuos, datos que se encuentran en la tabla 5 [37].

Tabla 5. Información de rendimientos agrícolas e insumos (unidad/ciclo de cultivo) [37].

Concepto	Total	Unidades
Tierra	1	ha
Plantas	70,000	pieza
Fertilizante	200	kg·ha <sup>-1</sup>
Glifosato	6.8	kg·ha <sup>-1</sup>
Arrivo 200 CE	140	kg·ha <sup>-1</sup>
Peso del tallo	1.04	kg·ha <sup>-1</sup>
Materia seca	39.19	%
Agua (riego)	4,000	m <sup>3</sup>
Peso del tallo	1,037.9	g
Volumen del jugo	510.38	ml

### 1.5.1.3 Distribución de biomasa de sorgo dulce

La biomasa de sorgo dulce obtenida por [37] mostró que el contenido de tallos representa la mayor proporción de biomasa, después de la hoja y panoja con un 92.5% y 7.5% respectivamente. La biomasa utilizada para el proceso industrial es únicamente la de los tallos, de los cuales un 59.1% corresponden al jugo y un 40.9% al bagazo. Los porcentajes correspondientes para la planta se muestran en la figura 9.

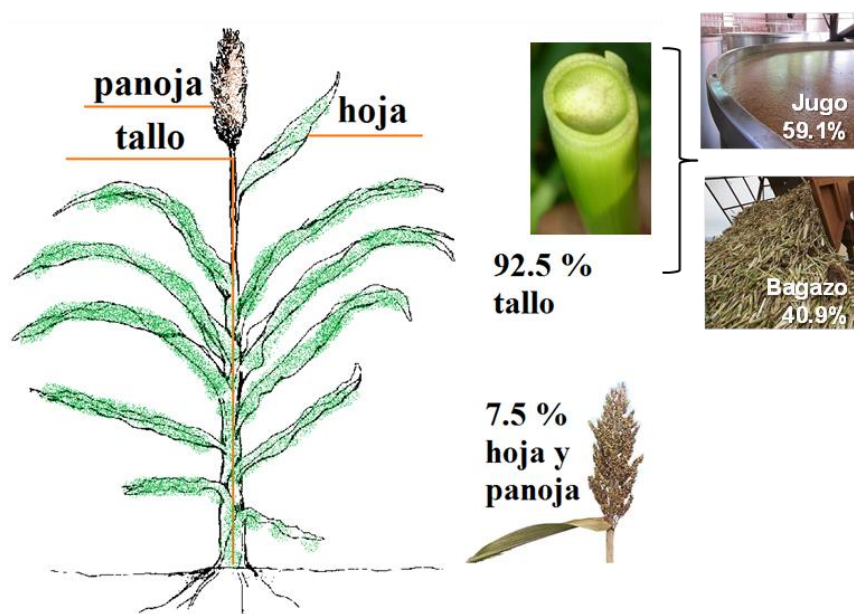


Figura 9. Distribución aérea de la biomasa del sorgo dulce [37].

## 1.5.2 Fase Industrial

En la fase industrial (producción de etanol), se contemplaron los datos a nivel laboratorio obtenidos por Franco [80] y Equihua [81], los cuales fueron extrapolados, según las condiciones utilizadas en el presente trabajo. Los datos que no se pudieron obtener de los trabajos de Franco y Equihua, como el poder calorífico del bagazo y jugo, densidad del mosto y etanol, análisis elemental del tallo de sorgo dulce, entre otros, fueron obtenidos de la literatura.

### 1.5.2.1 Producción de etanol de jugo

Para la producción de bioetanol, según Franco [80], el jugo de tallo de sorgo dulce fue sometido a un proceso de fermentación, donde las levaduras convierten los azúcares en moléculas de alcohol, más CO<sub>2</sub>; considerando que un 10% del volumen total a fermentar será utilizado para la preparación del inóculo, adicionando agua hasta llegar a una concentración de 6° Brix, adicionando el sulfato de amonio como fuente de nitrógeno. Después de este proceso, el mosto fue destilado en un sistema de destilación integral para obtener el bioetanol a una concentración de alrededor del 4.7%. Los datos que sirvieron como referencia para realizar los balances de materia y energía de la producción de bioetanol se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros utilizados en la producción de bioetanol, a partir de jugo

Parámetro	Cantidad	Unidad
Volumen de jugo contenido en un tallo de sorgo dulce	510.38 *	ml
° Brix del jugo extraído del tallo de sorgo dulce	14.4 *	° Brix
Sulfato de amonio	1.5	g·L <sup>-1</sup>
Levadura	1	g·L <sup>-1</sup>
Temperatura de fermentación	30	°C
Concentración de etanol	47.74	g·L <sup>-1</sup>

\* Promedios de los valores que se determinaron por parte de Peniche [37] y Franco [80].

### 1.5.2.2 Producción de etanol de tallo de sorgo dulce

En este caso la producción de bioetanol fue más compleja, ya que el material lignocelulósico debió ser secado, molido a un tamaño de partícula de 1 mm, para después separar la lignina, la hemicelulosa y así aprovechar la celulosa. Para esto fue necesario proporcionar un pretratamiento químico (básico- oxidativo) utilizando soluciones de NaOH al 6% y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 10%. Este material pretratado fue después sometido a un proceso de Sacarificación y Fermentación Simultánea (SFS) donde se obtuvo un mosto. Finalmente

este mosto fue sometido a un proceso de destilación integral para poder obtener una concentración de alrededor del 2.5% de bioetanol [81].

Para la producción de bioetanol a partir del material lignocelulósico, se consideraron los datos siguientes (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros utilizados en la producción de bioetanol, a partir del bagazo

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Peso del bagazo por tallo	1,037.9	g
Solución NaOH	6	% p/v
Humedad inicial	60	%
Humedad final	6	%
Solución de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10	% p/v
Tamaño de partícula	1	mm
Solución HCl	5.5	% p/v
Solución Reguladora (citrato de sodio)	30	ml
Enzima	0.5	ml·g <sup>-1</sup>
Sulfato de amonio	1.5	g·L <sup>-1</sup>
Levadura	1	g·L <sup>-1</sup>
Concentración de etanol	27.97	g·L <sup>-1</sup>
Temperatura de soluciones de NaOH y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	120 y 28 respectivamente	°C
Temperatura de SFS	37	°C

## **1.6 Justificación**

El desarrollo de tecnologías limpias en México debe tomar más importancia y generarse a nivel piloto o a nivel industrial; ya que investigaciones a escala de laboratorio conducen a buenos resultados para los biocombustibles.

La simulación de bioprocesos es una herramienta que hasta la fecha, en países como China, Estados Unidos y algunos pertenecientes a la Unión Europea, ha llevado a tomar la iniciativa de escalar los resultados de investigaciones de laboratorio a nivel piloto e incluso a nivel industrial en la obtención de bioetanol a partir de Sorgo Dulce. Por esta razón, la toma de decisiones para considerar nuevas tecnologías sustentables en nuestro país deberían estar consolidadas con un estudio previo de análisis de ciclo de vida (ACV), y esto permitirá tomar decisiones públicas durante la evaluación de nuevos proyectos de bioenergía.

En México existen pocos estudios de ACV, enfocados a temas sobre Energías Renovables. Debido a esto, en el presente trabajo se presenta un estudio de ACV de la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce cultivado en el Estado de Yucatán.

## **1.7 Hipótesis**

Es posible producir bioetanol a partir de sorgo dulce en el Estado de Yucatán, bajo un escenario que sea energética y ambientalmente viable.

## **1.8 Objetivos**

### **1.8.1 Objetivo general**

Evaluar la eficiencia energética y los impactos ambientales potenciales de cuatro escenarios de producción de bioetanol a partir del sorgo dulce cultivado en Yucatán.

### **1.8.2 Objetivos específicos**

1. Identificar cuatro escenarios de producción de bioetanol a partir del sorgo dulce para el estado de Yucatán, México.
2. Generar una base de datos que pueda servir para futuras comparaciones a nivel nacional del potencial del sorgo dulce para la producción del bioetanol.
3. Identificar el escenario más sostenible tomando en cuenta la eficiencia energética y los impactos ambientales potenciales de los cuatro propuestos.

## CAPITULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1 Análisis de Ciclo de Vida

En la figura 10 se presenta el esquema utilizado para llevar a cabo el ACV. Primeramente se inició con el planteamiento de escenarios que nos permitieron delimitar los procesos que se involucrarían en el estudio. Posteriormente se realizó un análisis de inventario, donde se recolectó la mayor cantidad de información relacionada con los límites de los diferentes procesos y después se realizó un balance de materia y energía tanto en Excel como en el programa Aspen Plus 8.4v para poder obtener requerimientos energéticos y algunas emisiones, los cuales también formaron parte del inventario. Finalmente se realizó el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la demanda energética de ciclo de vida mediante las metodologías de la RSB, ART, IPCC y DAE.

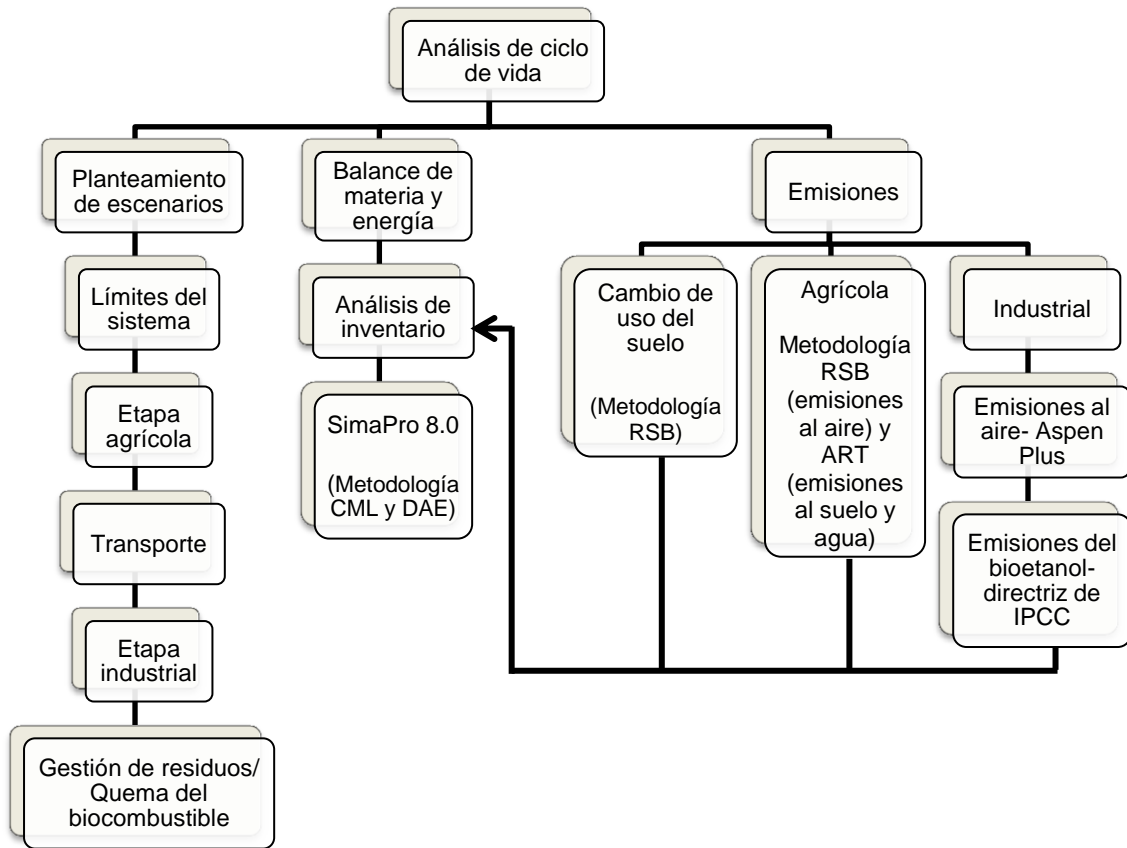


Figura 10. Diagrama general para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida.

## **2.2 Balances de materia y energía**

Se recolectó información relacionada con los escenarios que se seleccionaron y los límites del sistema, los cuales se detallan a continuación.

### **2.2.1 Planteamiento de escenarios**

El planteamiento de escenarios es fundamental para poder visualizar hasta qué punto del proceso se desea analizar. Para esto, fue preciso seleccionar el tipo de biocombustible, la materia prima que se desea aprovechar y el diseño del proceso apropiado para llevarlo a cabo (fermentación, pretratamiento, etc.).

Se estudiaron cuatro escenarios para un aprovechamiento integral de la biomasa del sorgo dulce en la obtención de bioenergía.

El primer escenario (EI) consistió en la producción de bioetanol a partir del jugo, sin aprovechar el bagazo.

El segundo escenario (EII) se planteó para la producción de bioetanol a partir del jugo de los tallos, además de la generación de energía por medio de la combustión del bagazo en una planta de vapor simple.

En el tercer escenario (EIII) se consideró la producción de bioetanol a partir del jugo de los tallos, además de cogeneración por medio de la combustión del bagazo en una planta de ciclo de combinado.

Finalmente en el cuarto escenario (EIV) se estudió la producción de bioetanol por dos etapas, la primera a partir del jugo de los tallos y la segunda a partir del material lignocelulósico (bagazo) por medio de un pretratamiento químico y el método de Sacarificación y Fermentación Simultánea (SFS).

Para todos los escenarios se consideraron las fases de evaluación siguientes: (a) cultivo y cosecha del sorgo dulce, (b) transporte de biomasa hacia la planta industrial, (c)



transformación de la biomasa a bioetanol, (d) quema del combustible y (e) gestión de desperdicios industriales.

## 2.2.2 Límites del sistema

### 2.2.2.1 Escenario I: Bioetanol a partir de jugo de los tallos de sorgo dulce

En este caso el aprovechamiento del tallo de sorgo dulce se limitó al uso del jugo para la producción de bioetanol, sin utilizar el bagazo. En la figura 11 se visualiza el diagrama de flujo correspondiente al escenario E1 con sus correspondientes entradas y salidas. Los datos de este proceso se extrapolaron del trabajo de Franco [80].

La distancia del área de cultivo a la planta industrial se consideró de 10 km, la razón según [41], es tener la menor cantidad de emisiones por este concepto.

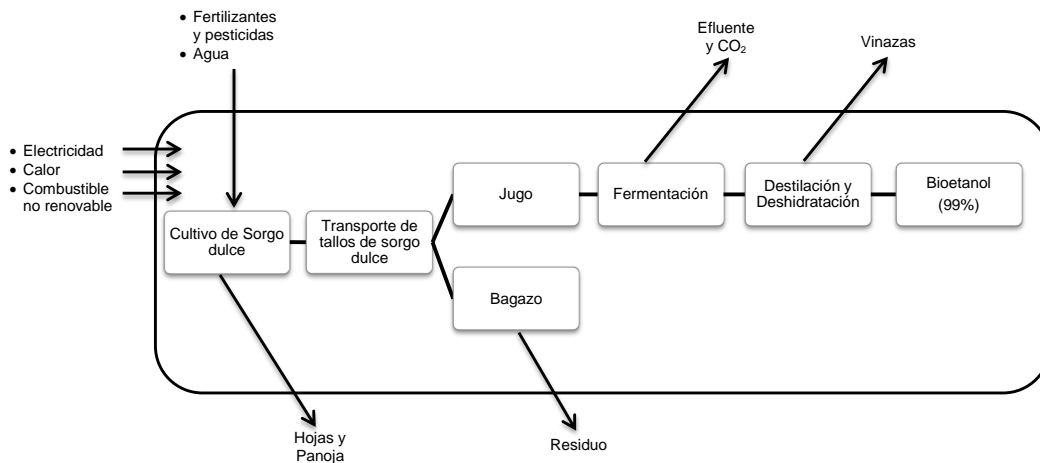


Figura 11. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol a partir del jugo de sorgo dulce-escenario E1.

Para este primer escenario, la obtención de bioetanol se produce a partir del jugo, el cual pasa por un proceso de fermentación (a una temperatura de 30 °C), donde las levaduras convierten los azúcares en moléculas de alcohol, más CO<sub>2</sub>. Después se prosigue a la destilación para poder obtener el etanol al 4.7%, teniendo como resultado grandes cantidades de vinaza. Finalmente para lograr el etanol al 99.9%, que es la pureza requerida para poder llevar a cabo las mezclas y ser utilizado como combustible, se pasa por un deshidratador de tamices moleculares y un regenerador, donde se tienen

pequeños residuos de vinaza y etanol. Para poder obtener los rendimientos industriales y emisiones de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  de los procesos de destilación y deshidratación, se corrieron simulaciones en el programa Aspen Plus, utilizando el modelo termodinámico NRTL (figura 12). En el caso de las simulaciones de los intercambiadores de calor HX3 y HX4, se utilizaron las tablas de vapor SteamNBS (ver tabla 8).

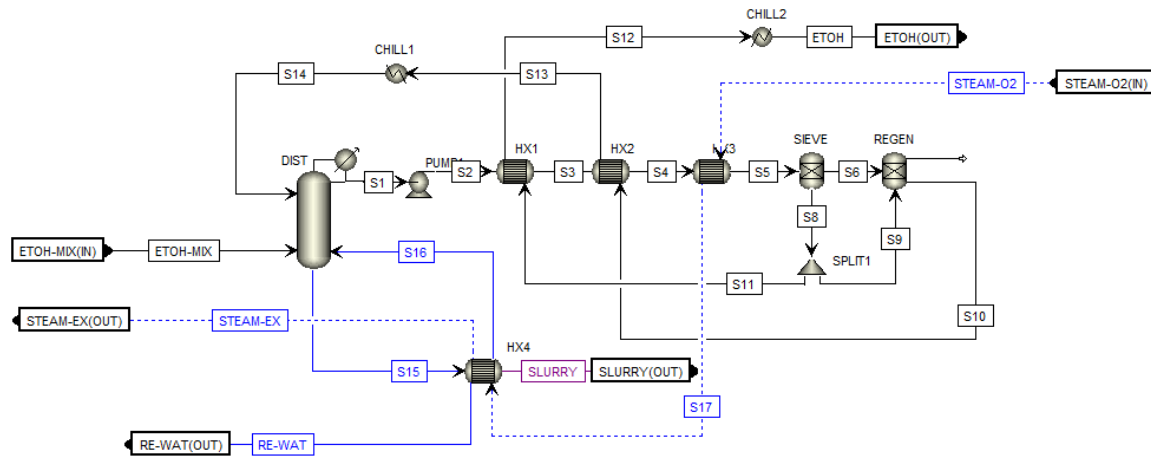


Figura 12. Proceso de destilación y deshidratación para los escenarios, simulados por el programa Aspen Plus.

El número de platos teóricos en el destilador y el deshidratador fue de 30 para cada uno, esta elección proporcionó el porcentaje de alcohol requerido, 95% para el proceso de destilación y 99% para el proceso de deshidratación. Además, en la selección de platos se observó que no había diferencia significativa en cuanto a la energía de calentamiento y energía de condensación después de este número (Anexos 1a y 1b). Considerando que un producto que requiera alta pureza, son necesarias varias etapas o platos; condiciones que implican costos de capital importantes y altos costos energéticos debido al mantenimiento de condiciones de vacío en torres de destilación con gran cantidad de platos [82].

Tabla 8. Condiciones de operación para los procesos de destilación y deshidratación en Aspen Plus.

Equipo	Abreviatura	Condiciones de operación	
Destilador	DIST	Equipo en Aspen Plus	RadFrac
		Presión (atm)	0.2
		Platos	30
		Tipo de calculo	Equilibrio
		Condensador	Total
		Calentador	Ninguno
		Fases validas	Vapor-líquido
		Convergencia	Estándar
		Tasa de destilación (kg)	2,402 (EI, EII y EIII) / 3,875 (EIV)
		Corriente de etanol	Sobre la etapa 14
		Corriente de etanol recirculado	Por encima de etapa 16
Deshidratador	SIEVE	Equipo en Aspen Plus	SEP
		Presión (atm)	S6-113 / S8-2.72
		Temperatura (°C)	115
		Corriente de salida	S8
		Fracción de separación	Agua/0.01905 [83]
Regenerador	REGEN	Equipo en Aspen Plus	Mixer
Divisor	SPLIT1	Equipo en Aspen Plus	Splitter
		Fracción de divisor	S9-0.15
Bomba	PUMP1	Equipo en Aspen Plus	Pump
		Presión de descarga (atm)	2.72 [83]
Enfriador	CHILL1	Equipo en Aspen Plus	Heater
		Presión (atm)	1
		Temperatura (°C)	80
	CHILL2	Equipo en Aspen Plus	Heater
		Presión (atm)	1
		Temperatura (°C)	32
Intercambiador de calor	HX1	Equipo en Aspen Plus	Heat exchanger
		Temperatura- corriente caliente	107
	HX2	Equipo en Aspen Plus	Heat exchanger
		Temperatura- corriente caliente	87
	HX3	Equipo en Aspen Plus	Heat exchanger
		Temperatura- corriente fría	115
		Modelo termodinámico- corriente caliente	SteamNBS
	HX4	Equipo en Aspen Plus	Heat exchanger
		Fracción de vapor- corriente fría	0.1835
Modelo termodinámico- corriente caliente		SteamNBS	

### 2.2.2.2 Escenarios II y III: Bioetanol y cogeneración

Estos escenarios se examinaron debido a que es el caso que habitualmente ocurre en los ingenios azucareros de México, esencialmente el jugo es utilizado para la obtención de azúcar, y el bagazo lo utilizan directamente para abastecer algunos requerimientos energéticos de la planta industrial. En la figura 13 se visualiza el diagrama de flujo correspondiente a los escenarios EII y EIII, cabe destacar que la única diferencia entre ellos es la tecnología utilizada, como se mencionó anteriormente, para el escenario EII el empleo de una planta de vapor simple y para el escenario EIII una planta de vapor de ciclo combinado. Al igual que el escenario anterior, los datos de rendimiento de bioetanol se consideraron según los datos de Franco [80].

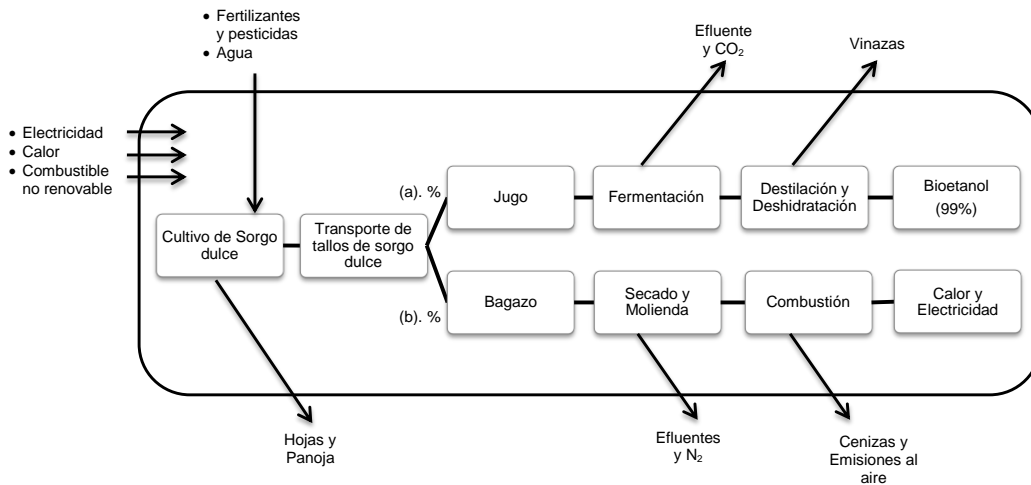


Figura 13. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol y combustión a partir de sorgo dulce, para los escenarios EII y EIII.

Para estos dos escenarios se consideraron dos etapas, la primera (a) es la obtención de bioetanol a partir del jugo del tallo de sorgo dulce y la segunda es la obtención de calor y electricidad a partir del bagazo. El proceso para la producción de bioetanol a partir del jugo es el que se mencionó en el escenario EI. En la segunda etapa (b) el bagazo es secado en el simulador de Aspen Plus, donde el secador se simuló como un RSTOIC acoplado a un equipo Flash y la fracción de conversión se obtuvo de un bloque de cálculo para reducir el contenido de humedad hasta el 6%. Seguidamente, el bagazo pasa por un molino hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 8 mm [84]. Después el material pasa a un horno de combustión, trabajando a una temperatura de 110 °C. Luego

son separados los residuos de ceniza y el vapor a presión hace mover la turbina para poder transformar esa energía mecánica en electricidad, el vapor que sale de la turbina se enfría para convertirse en agua y así iniciar de nuevo el proceso de producción de vapor, para el caso del escenario EII.

En el escenario EIII, el gas combustible se mezcla con aire proveniente del compresor a presión, produciendo la combustión y provocando el giro de la turbina de gas. El calor de la combustión produce vapor y éste, a presión, hace girar a la turbina de vapor donde finalmente la energía mecánica producida por las turbinas es convertida en energía eléctrica por el generador. Parte de ese vapor es enfriado convirtiéndose en agua para empezar nuevamente el ciclo de producción de vapor.

El programa de Aspen Plus requirió información del análisis elemental y poder calorífico de la biomasa para el proceso, la cual se tomó de la literatura. Esta se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Datos de análisis elemental y poder calorífico del bagazo, requeridos en Aspen Plus.

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Carbón	45.4	%	[85]
Hidrógeno	6.10	%	[85]
Oxígeno	43.19	%	[85]
Nitrógeno	0.5	%	[85]
Azufre	0.01	%	[85]
Cenizas	4.8	%	[85]
Poder calorífico-bagazo	17.3	MJ·kg <sup>-1</sup>	[86]

En las figuras 14 y 15 se presentan los modelos de combustión para los escenarios EII y EIII respectivamente. Fueron simulados bajo el modelo termodinámico de Peng-Robinson con modificaciones de Boston-Mathias, al menos que se señale otra especificación en la tabla 10.

En la figura 16 se muestra el diagrama por jerarquía, corrido en el programa de Aspen Plus para los sistemas de bioetanol y generación de energía eléctrica y vapor (escenarios EII y EIII).

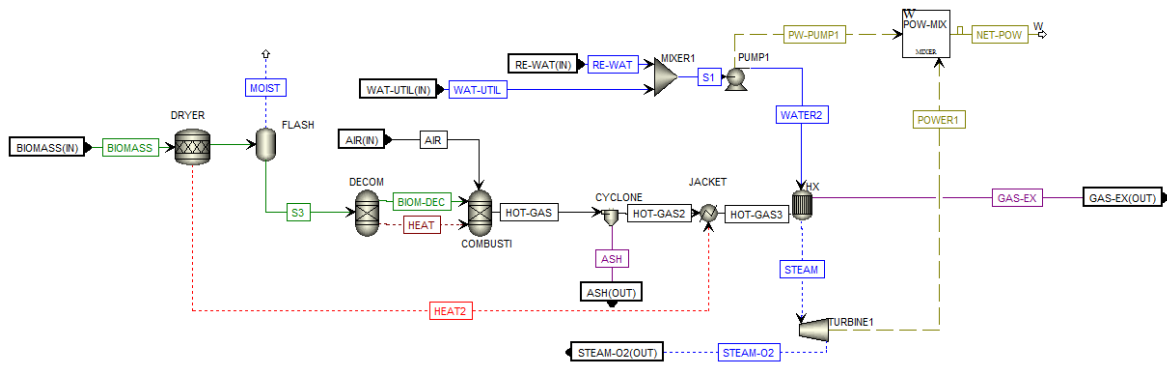


Figura 14. Diagrama del proceso de combustión en una planta de vapor simple.

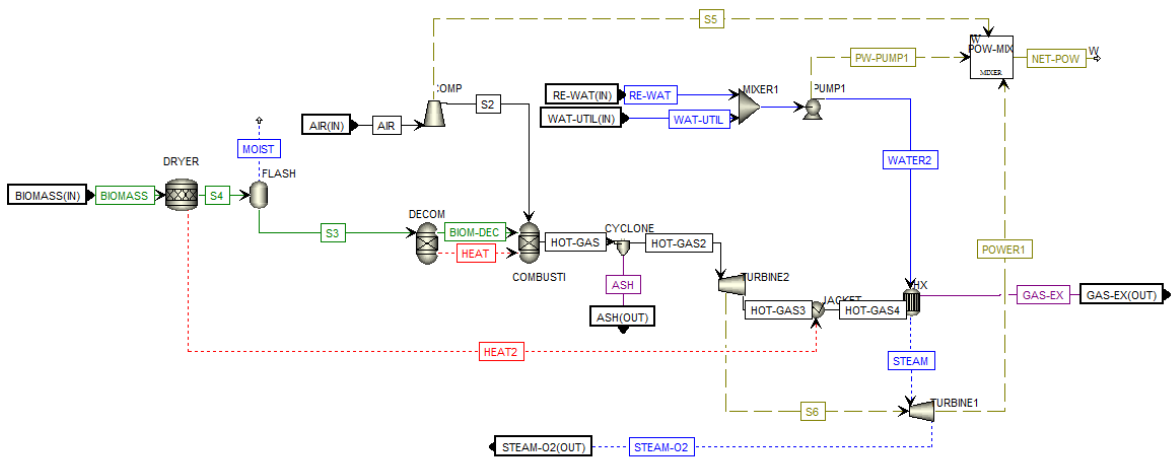


Figura 15. Diagrama del proceso de combustión en un modelo de ciclo combinado.

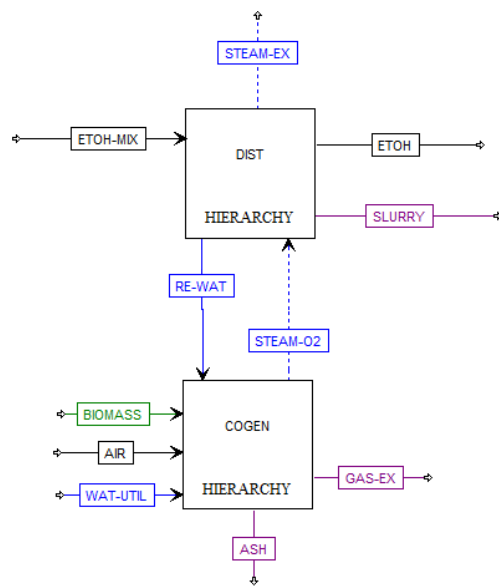


Figura 16. Diagrama jerárquico del proceso de destilación y cogeneración.

Tabla 10. Condiciones de operación para los procesos de cogeneración en Aspen Plus.

Equipo	Abreviatura	Condiciones de operación	
Secador	DRYER	Equipo en Aspen Plus	RStoic
		Temperatura (°C)	110
		Presión (atm)	1
		Fases validas	Vapor-líquido
		Reacción	Biomass --> 0.055084 water Fracción conversión 0.583085
	FLASH	Equipo en Aspen Plus	Flash2
		Presión (atm)	1
		Potencia (kW)	0
		Fases validas	Vapor-líquido
	JACKET	Equipo en Aspen Plus	Heater
Presión (atm)		1	
Combustión	DECOM	Equipo en Aspen Plus	RYield
		Temperatura (°C)	110
		Presión (atm)	1
		Fases validas	Vapor-líquido
	COMBUSTI	Equipo en Aspen Plus	RGibbs
		Opciones de cálculo	Cálculo del equilibrio químico y de fase
		Presión (atm)	1 (ciclo simple) / 8 (ciclo combinado)
Ciclón	CYCLONE	Equipo en Aspen Plus	Ssplit
Intercambiador de calor	HX	Equipo en Aspen Plus	Heat exchanger
		Temperatura- corriente caliente	180
		Modelo termodinámico- corriente fría	SteamNBS
Bomba	PUMP1	Equipo en Aspen Plus	Pump
		Presión de descarga (atm)	20
		Modelo termodinámico	SteamNBS
Turbina	TURBINE 1 (ciclo simple y ciclo combinado)	Equipo en Aspen Plus	COMPR
		Modelo	Turbina
		Presión de descarga (atm)	1
		Eficiencia isentrópica	0.85
		Eficiencia mecánica	0.97
Turbina	TURBINE 2 (ciclo combinado)	Equipo en Aspen Plus	COMPR
		Modelo	Turbina
		Presión de descarga (atm)	1
		Eficiencia isentrópica	0.85
		Eficiencia mecánica	0.97
Mezclador	MIXER1	Equipo en Aspen Plus	Mixer
Compresor	COMP	Equipo en Aspen Plus	COMPR
		Modelo	Compresor
		Tipo	Isentrópico
		Presión de descarga (atm)	8

### 2.2.2.3 Escenario IV: Bioetanol a partir de jugo y del bagazo

En la figura 17 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al escenario EIV. Este escenario se planteó contemplando dos etapas. La primera etapa (a) corresponde a la producción de etanol a partir del jugo, exactamente el mismo proceso como se mencionó anteriormente en el escenario EI. La segunda etapa (b), corresponde a la producción de etanol a partir del bagazo del sorgo dulce.

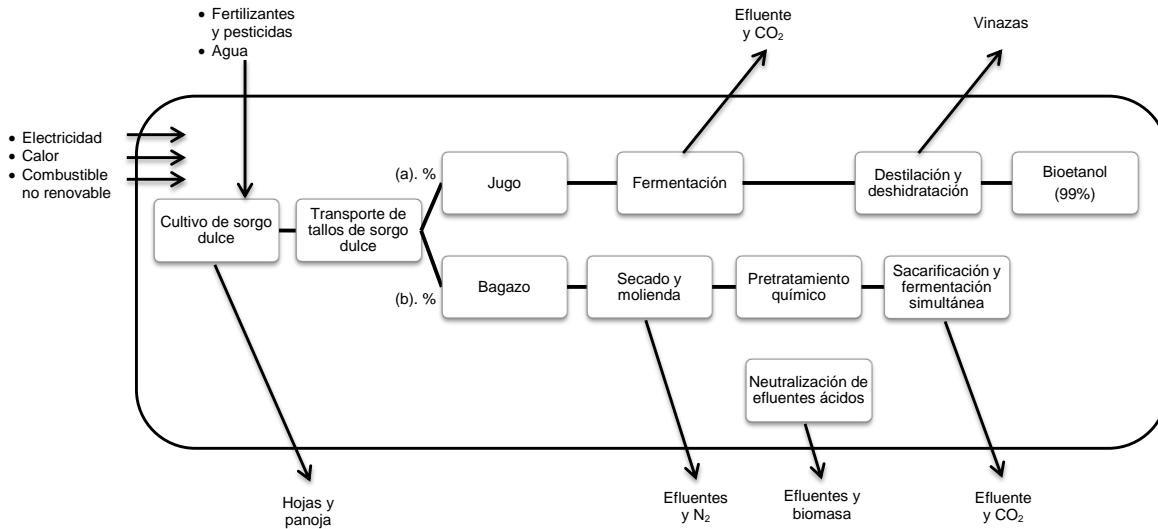


Figura 17. Diagrama de flujo que ilustra la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce para el escenario EIV.

Para el proceso de secado se sigue el mismo procedimiento que para los escenarios EII y EIII, es decir hasta tener una humedad del 6% en la biomasa. Después este bagazo pasa por dos molinos, el primero para obtener el tamaño de partícula de 8 mm y posteriormente este material pasará por un segundo molino hasta llegar al tamaño ideal para entrar al proceso de pretratamiento químico, que es de 1 mm. En el pretratamiento químico se llevan a cabo reacciones energéticas y el calor de reacción se calculó mediante la ecuación 1; en este punto se cuenta con residuos de biomasa y químicos [81]. La biomasa recuperada pasó a un tanque para llevar a cabo la SFS, usando una solución reguladora, enzimas y un inóculo de levaduras, teniendo como residuo efluentes y CO<sub>2</sub>. Los pasos subsecuentes de destilación del mosto y deshidratación del etanol se hacen en conjunto con la etapa (a), como se mostró en la figura 12. Cabe destacar que para fines industriales, el ácido clorhídrico se sustituyó por ácido sulfúrico, por ser menos agresivo químicamente y más económico.



$$\Delta H = mx1 \cdot \int_{T_{ref}}^{T1} Cp X1dT1 + mx2 \cdot \int_{T_{ref}}^{T2} Cp X2dT2 + mxn \cdot \int_{T_{ref}}^{Tn} Cp XndTn \dots (1)$$

Dónde:

$\Delta H$  =Calor de reacción [MJ]

$mx1$ = Materia prima (bagazo, NaOH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [kg]

$T1$ = Temperatura de calentamiento [°C]

$T_{ref}$ = Temperatura de referencia = 28 °C

$Cp$ = Calor específico de la materia prima= 1,637.55 J·°C<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> [87]

## 2.3 Evaluación energética

Esta se llevó a cabo por medio de la metodología de Demanda Acumulada de Energía (DAE- SimaPro 8.0), además de llevar a cabo el cálculo de Razón de Energía Fósil (REF).

### 2.3.1 Demanda Acumulada de Energía

Se seleccionó la DAE en el programa de SimaPro, la cual consistió en la cuantificación del total de energía fósil consumida por un sistema directa o indirectamente a lo largo del ciclo de vida del bioetanol.

El método para calcular la DAE está basado en el método publicado por Ecoinvent versión 2.0 y expandida por Pré Consultants de recursos energéticos disponibles en la base de datos de SimaPro. Las unidades en las que se maneja el resultado es en MJ de energía no renovable [88].

### 2.3.2 Razón de energía fósil

La eficiencia energética o razón de energía fósil, se evaluó por medio de la siguiente ecuación [56]:

$$REF = \frac{Ep}{Ec} (2)$$

Dónde:

$REF$  = Razón de Energía Fósil [MJ/MJ]

$Ep$  = Energía producida [MJ]

$Ec$  = Energía fósil consumida, proveniente de la DAE total para cada escenario [MJ].

## 2.4 Evaluación ambiental

### 2.4.1 Emisiones generadas en la fase agrícola

Se estudiaron los impactos potenciales referentes al cambio de uso de suelo (CUS), dado que la producción de la materia prima de la biomasa requiere tierras anteriormente dedicadas a otros fines. El valor de CUS se calculó por medio de la herramienta de la RSB, la cual se puede llenar con los parámetros solicitados en la calculadora libre de la RSB, la liga para poder consultarla es la siguiente: <http://www.rsb.org/ghgcalc/> [89]. Las variables que se consideraron para 1 ha de tierra fueron las siguientes:

- Producto: Sorgo dulce
- Información geográfica:
  - Ecozona: bosque caducifolio húmedo tropical
  - Precipitación pluvial: 600- 1500 mm/año [90]
- Suelo, de acuerdo a la zona de producción (USDA, Departamento de agricultura de Estados Unidos de América): Inceptisol
- Uso anterior de tierra:
  - Uso de suelo, es decir, el cambio que sufrirá el suelo. Para este caso se seleccionó “de pastizal a tierra de cultivo”.
- Uso actual del suelo
  - Tipo de suelo: mineral
  - Clasificación de suelo mineral: cambisol [37,90]

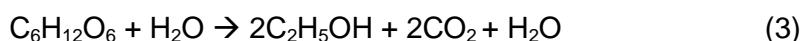
Las emisiones provocadas por el uso de fertilizantes se determinaron por medio de ART [91] para las emisiones al agua y suelo, mientras que para las emisiones generadas al

aire se calcularon mediante la metodología de la RSB “GHG Calculation Methodology” [92]. Las variables consideradas para el cálculo fueron:

- Rendimiento de biomasa.
- Requerimientos de fertilizantes y herbicidas.
- Captura de carbono, este parámetro se calculó de acuerdo a la composición de carbono del tallo de sorgo dulce (tabla 9).

#### **2.4.2 Emisiones generadas en la fase industrial**

Dentro del cálculo de las emisiones generadas al aire, por medio del programa Aspen Plus, se tiene las que se originaron en el proceso de combustión del bagazo. Por otro lado tenemos las emisiones atmosféricas del CO<sub>2</sub> originado en el proceso de la fermentación, las cuales se calcularon por medio de la ecuación estequiométrica siguiente:



La densidad del mosto fue requerida y para este estudio se tomó el valor de 1.3573 kg·L<sup>-1</sup> [93]. Toda la información que forma parte del análisis de inventario se almacenó en el programa Excel y ésta se exportó al programa de SimaPro para poder calcular las emisiones ambientales de ciclo de vida.

#### **2.4.3 Impactos ambientales potenciales de ciclo de vida**

Se utilizó la metodología de la CML de la Universidad de Leiden. Esta se eligió debido a que proporciona una lista de categorías de evaluación de impactos potenciales utilizados en la mayoría de los estudios de ACV [86]. En la tabla 11 se presentan las categorías e indicadores utilizando la metodología CML 2 baseline 2000 V2.05 / the Netherlands, 1997, en SimaPro [77].

Tabla 11. Categorías de impacto e indicadores, según la metodología elegida.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidades</b>
<b>PRRA</b> , potencial de reducción de los recursos abióticos	kg Sb <sub>eq</sub>
<b>PA</b> , potencial de acidificación	kg SO <sub>2eq</sub>
<b>PE</b> , potencial de eutrofización	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> <sub>eq</sub>
<b>PCG</b> , potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2eq</sub>
<b>PRCO</b> , potencial de reducción de la capa de ozono	kg CFC-11 <sub>eq</sub>
<b>PTH</b> , potencial de toxicidad humana; <b>PEAF</b> , potencial ecotoxicidad de agua fresca; <b>PEAM</b> , potencial ecotoxicidad de agua marina; <b>PET</b> , potencial ecotoxicidad terrestre.	kg 1,4-DCB <sub>eq</sub>
<b>POF</b> , potencial de oxidación fotoquímica.	kg C <sub>2</sub> H <sub>4eq</sub>

## 2.5 Mitigación de gases de efecto invernadero

En la figura 18 se muestran los límites del sistema simplificados para los escenarios propuestos en esta investigación y los sistemas de referencia fósil. Estos últimos producen los mismos productos/servicios que los fósiles, por lo tanto, las emisiones generadas se tomaron como factores de emisión de referencia para compararlas a los escenarios propuestos en este trabajo de investigación. Estas fueron corridas en el programa de SimaPro, tanto para la gasolina (Resto del mundo) como para la electricidad (México). Los factores específicos de GEI y la demanda de energía de estos productos fósiles son multiplicados por las cantidades finales de los productos producidos (bioetanol y electricidad), así las emisiones de GEI finales y la demanda de energía primaria acumulada del sistema de referencia fósil se puede estimar.

Dentro de algunas limitaciones para este trabajo, tenemos que los resultados del tratamiento de gestión de residuos se toman de la base de datos de SimaPro y en muchos casos éste programa maneja como carbón neutral aquellas emisiones que provienen de la biomasa, por lo que no se obtienen las emisiones reales de CO<sub>2</sub>, para algunos casos, como el tratamiento del bagazo para el escenario EI. Otra limitación es que el programa de Aspen Plus no permite identificar la energía requerida para el tanque de destilación, ya que esta se realiza por medio del método de vacío.

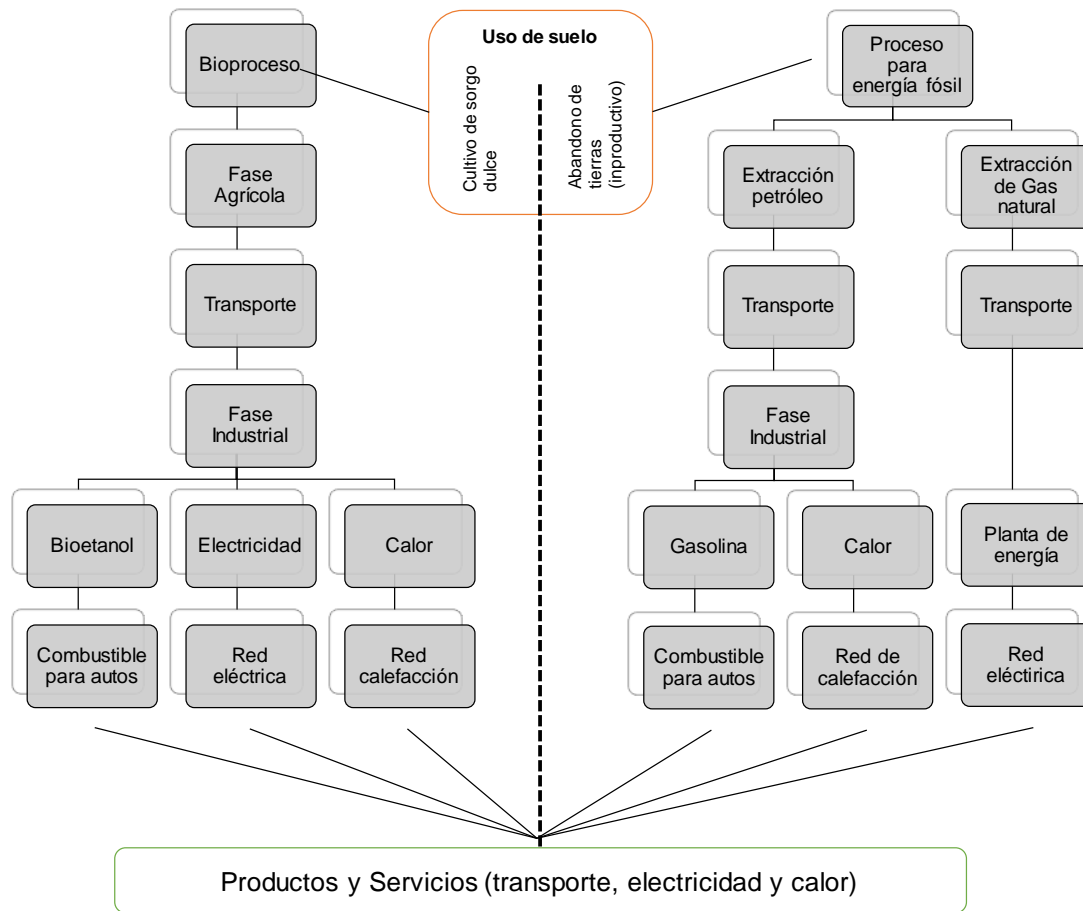


Figura 18. Comparación entre la cadena de producción del sistema estudiado y la referencia (combustibles fósiles).

## CAPITULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan de acuerdo a los objetivos planteados previamente. Primeramente se presenta los balances de materia y energía generados en una base de datos de Excel, conforme a las entradas y salidas de los insumos y productos requeridos en el proceso, después el desempeño energético y finalmente la evaluación ambiental asociada a los diferentes escenarios propuestos para la producción de bioetanol de sorgo dulce en el Estado de Yucatán.

#### 3.1 Balances de materia y energía

Tomando como referencia una densidad de plantación de 70,000 plantas por hectárea, se realizó una extrapolación de los datos obtenidos en laboratorio para determinar los requerimientos de insumos para la fase de cultivo. Los resultados se observan en la figura 19, siendo el rendimiento de tallos de sorgo dulce de  $78,553 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  por ciclo de cultivo, del cual los residuos (hoja y panoja) se quedan en campo [37] y la materia prima que se le dará un aprovechamiento con fines energéticos (tallos) es de  $72,653 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

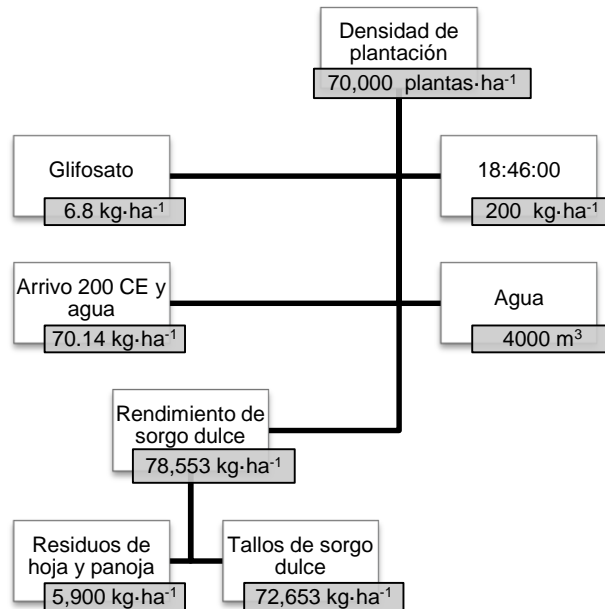


Figura 19. Insumos agrícolas extrapolados a la densidad de plantación y rendimientos de sorgo dulce.

En las figuras de la 20 a 23 se puede visualizar los balances para cada uno de los escenarios planteados, con sus respectivas entradas y salidas.

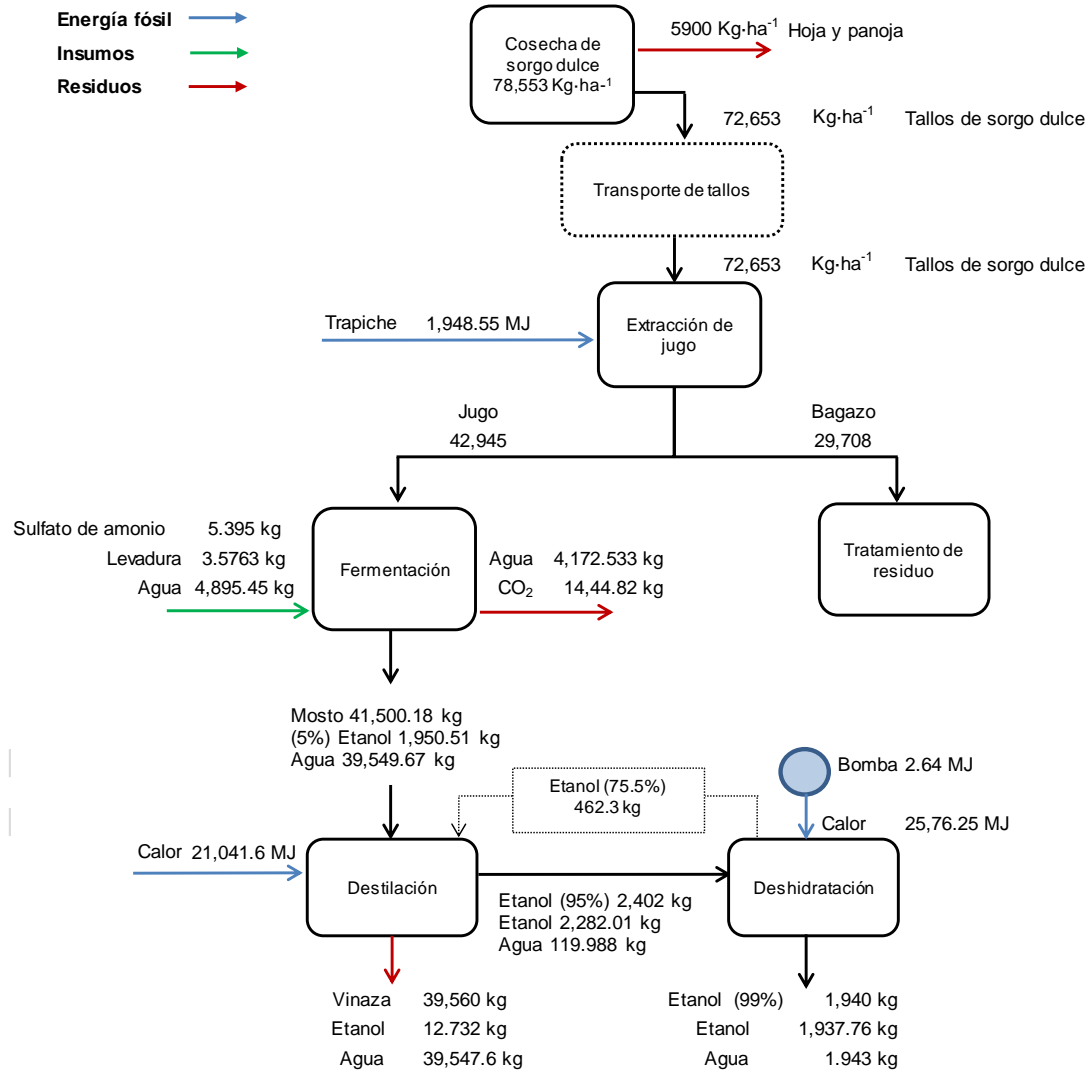


Figura 20. Balance de materia y energía para el escenario E1.

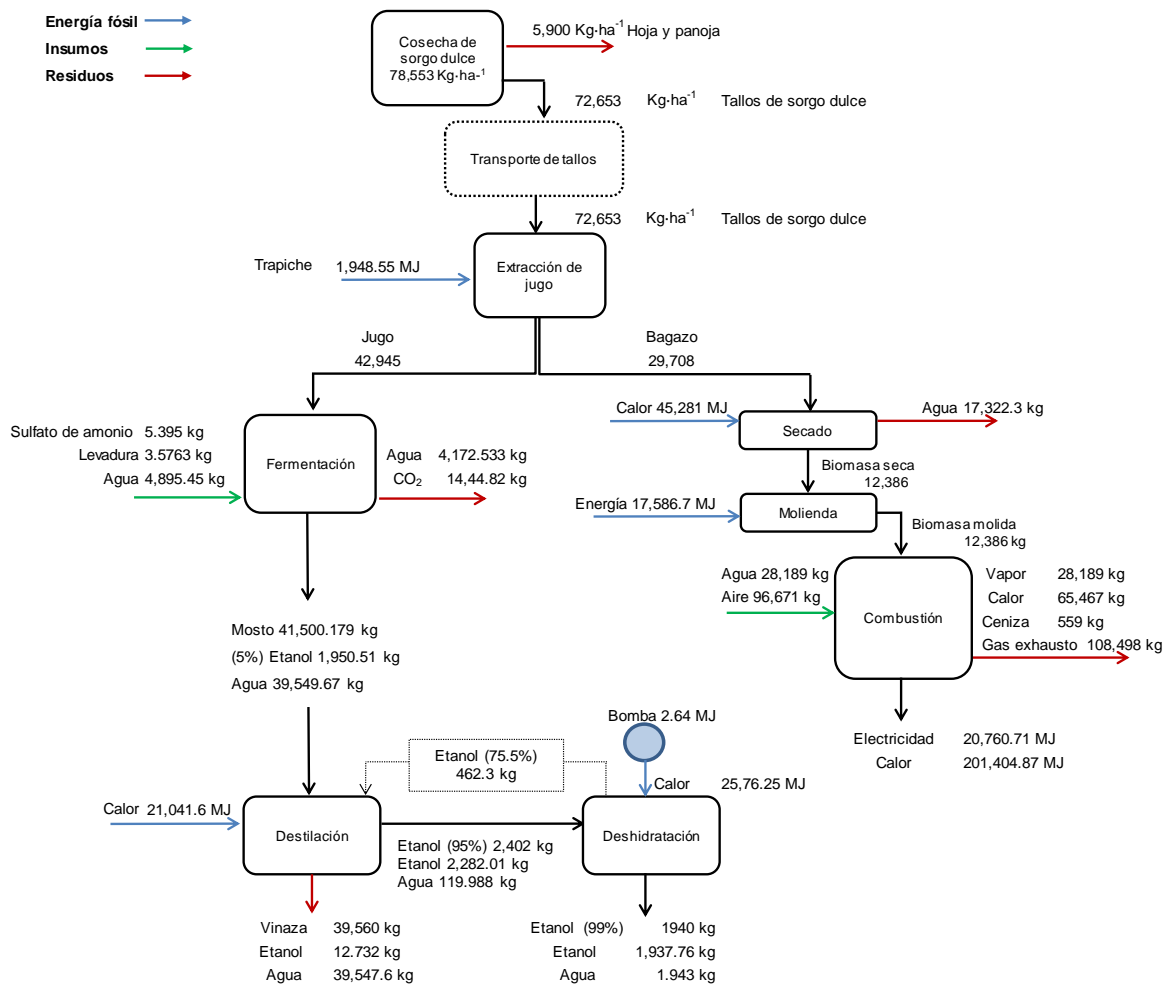


Figura 21. Balance de materia y energía para el escenario EII.

El rendimiento calculado de bioetanol para los escenarios EI, EII y EIII fue de 1,940 kg-ha<sup>-1</sup>, sin embargo tanto para los escenarios EII y EIII existe una generación de energía de 20,760.7 y 61,720.7 MJ respectivamente por la quema del bagazo de sorgo dulce, la cual abastece la energía eléctrica requerida por la planta, principalmente en el proceso de extracción de jugo (trapiche), bomba utilizada para la deshidratación del bioetanol y para el proceso de la molienda, teniendo además un excedente de energía de 1,222.82 y 42,182.9 MJ, para los escenarios EII y EIII respectivamente, la cual podría venderse a Comisión Federal de Electricidad (CFE). La eficiencia energética, con respecto a la cogeneración de estos dos escenarios es de 10.30% para el EII y 30.65% para el EIII.



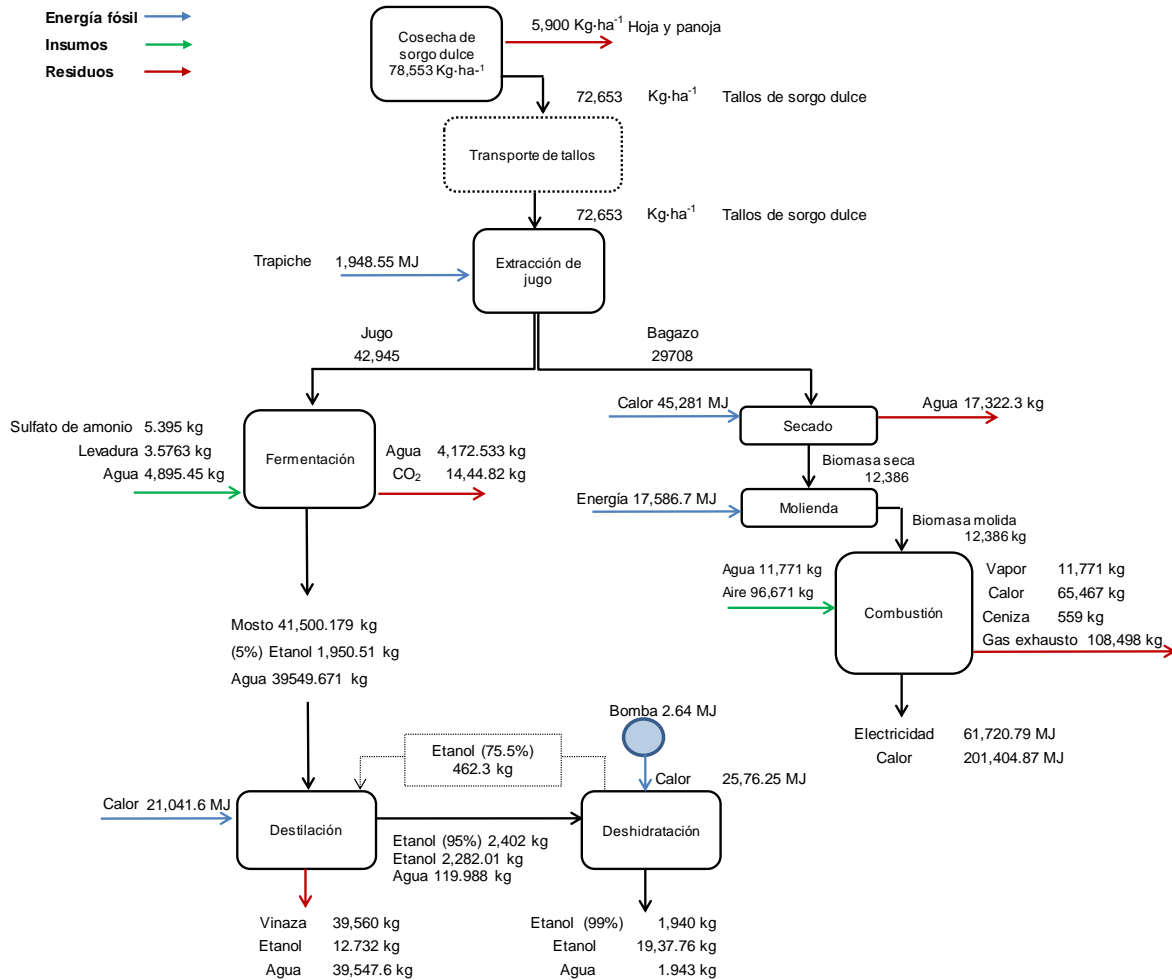


Figura 22. Balance de materia y energía para el escenario EIII.

En el escenario EIV se calculó que la cantidad de bioetanol producido es de 3,129 kg-ha<sup>-1</sup>, ya que además del jugo, el bagazo fue utilizado para su obtención. A pesar de que es una cantidad mayor, se encontró que la cantidad de energía eléctrica requerida es de 120,573.31 MJ y de calor 85,663.72 MJ. Esta cantidad de energía se incrementa por el uso del molino 2, donde se requiere un tamaño de partícula de 1 mm para el pretratamiento químico, además de la energía de reacción del pretratamiento químico.

La estimación de la energía eléctrica necesaria para la operación del trapiche y molinos, requirió de equipos a nivel industrial que pudieran trabajar con los rendimientos obtenidos, los datos obtenidos se pueden ver en la tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones de los equipos para tratar la biomasa antes de procesarla.

Equipo	Potencia	Capacidad	Producción (entrada)	Energía total	Referencia
Trapiche	10 hp	1000 kg·h <sup>-1</sup>	72,653 kg	1,948 MJ	[94]
Molino 1 (partícula de 8 mm)	0.53 hp	1 kg·h <sup>-1</sup>	12,385 kg	17,586 MJ	[84]
Molino 2 (partícula de 1 mm)	1.63 hp	1 kg·h <sup>-1</sup>	12,385 kg	54,054 MJ	[84]

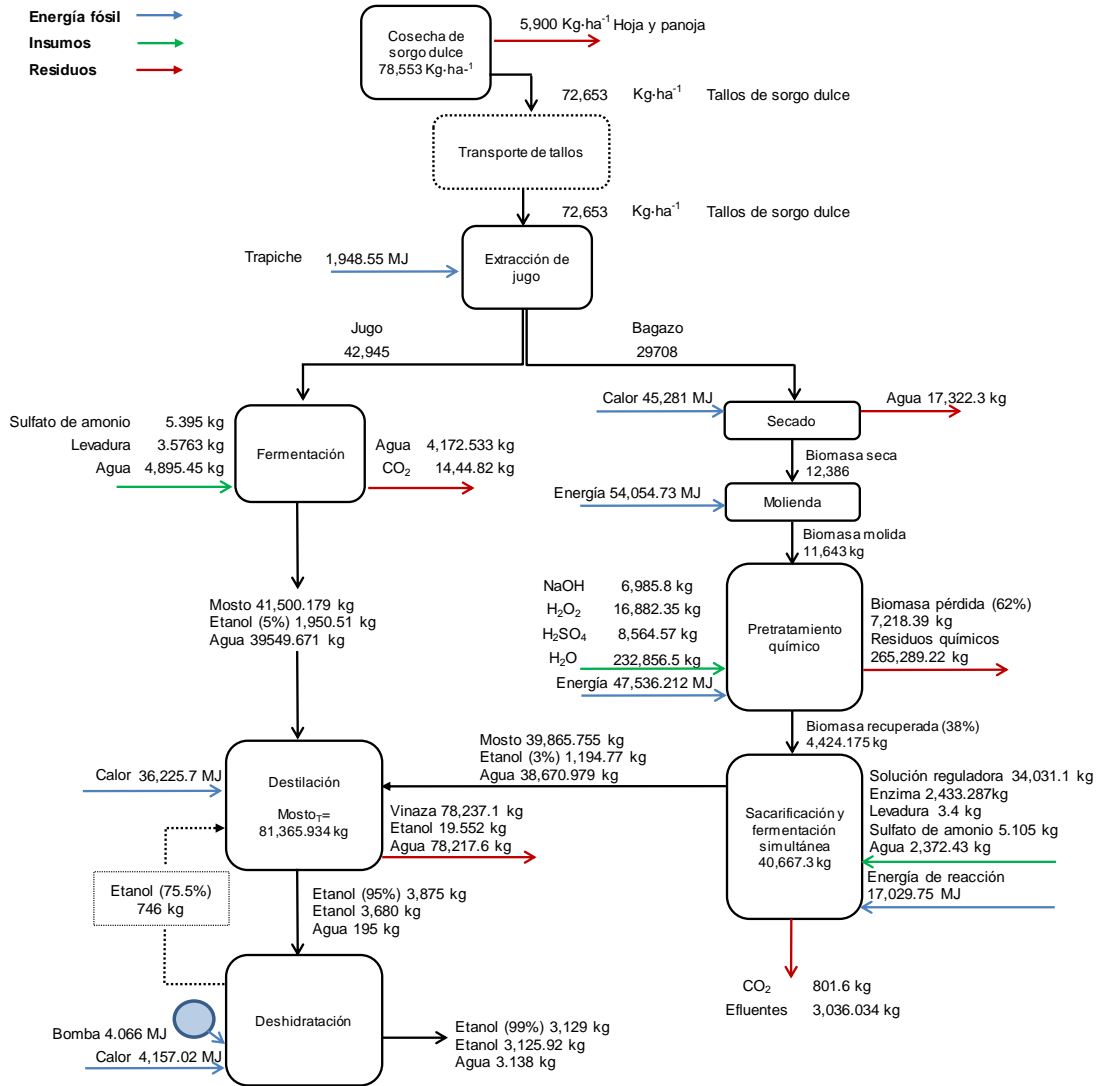


Figura 23. Balance de materia y energía para el escenario EIV.

Con más detalle la figura 24 muestra el porcentaje correspondiente a la cantidad de energía utilizada por los equipos en cada escenario, en ella podemos ver que para el

escenario EI el 99% de la energía utilizada es por el trapiche y que la energía requerida por la bomba es insignificante. Para los escenarios EII y EIII el 90% de energía es requerida por el molino, seguido del trapiche con un 9.9%. En cuanto al escenario EIV la energía del molino es superior con un 45% y de manera insignificante el porcentaje requerido de energía por el trapiche y bomba son del 2 y 0.003% respectivamente.

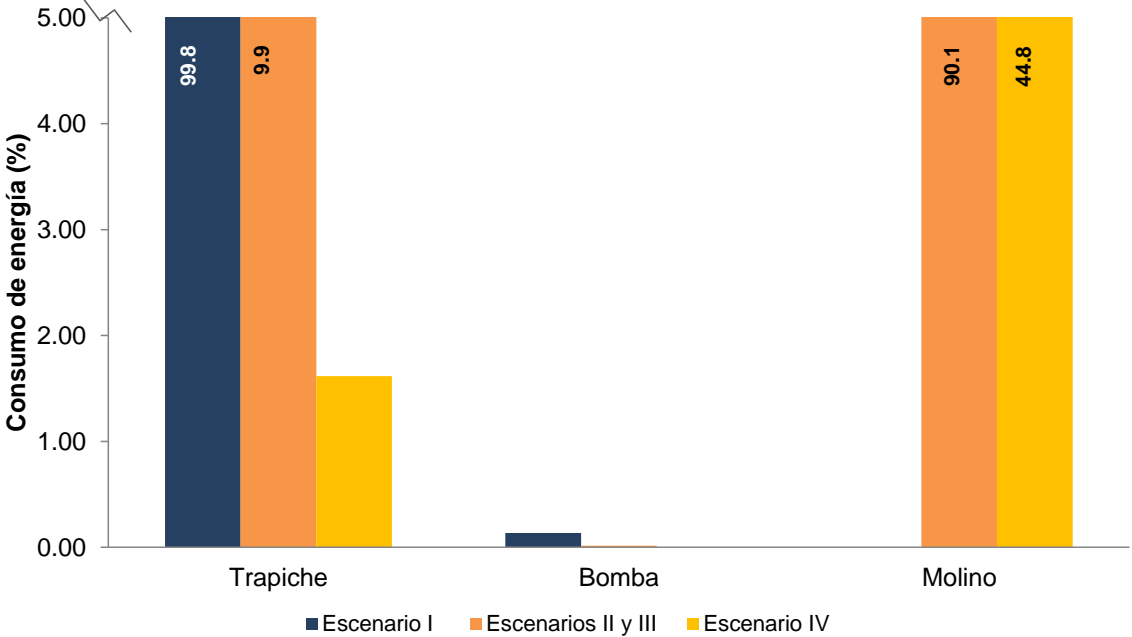


Figura 24. Porcentaje de energía requerida por los equipos.

Una vez recolectada la información de los balances de materia y energía (los cuales se originaron de cálculos hechos en Excel y Aspen Plus como se mencionó anteriormente), se conformó el inventario que se muestra en la tabla 13. En el inventario se determinaron las entradas de los insumos y energía necesarios para correr la simulación en el programa de SimaPro, así como algunas emisiones y efluentes generados por los procesos. Finalmente los productos con importancia como alternativas de energía renovable, en este caso el bioetanol para los cuatro escenarios y la energía eléctrica producida por el bagazo en los escenarios EII y EIII, se compararan con un sistema fósil de referencia.

Tabla 13. Inventario de ciclo de vida para la producción de bioetanol.

BALANCE DE MATERIA		CANTIDAD	UNIDADES
<b>Entradas</b>	Tallos de sorgo dulce	72,653	kg·ha <sup>-1</sup>
	Jugo del tallo de sorgo dulce	42,945	kg·ha <sup>-1</sup>
	Sulfato de amonio (fermentación-jugo)	5.36	kg
	Levadura (fermentación-jugo)	3.573	kg
	NaOH (pretratamiento)	6,985.8	kg
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pretratamiento)	16,882.35	kg
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pretratamiento)	8,564.57	kg
	Agua (pretratamiento)	232,856.5	kg
	Solución reguladora (agua+ citrato de sodio, SFS)	34,031	kg
	Enzima (SFS)	2,433.29	kg
	Levadura (SFS)	3.403	kg
	Sulfato de amonio (SFS)	5.105	kg
	Agua (SFS)	2,372.43	L
	<b>Salidas</b>	Bagazo de sorgo dulce	29,708
Bioetanol <sup>+</sup> (EI, EII y EIII)		1,940	kg·ha <sup>-1</sup>
Bioetanol <sup>+</sup> (EIV)		3,129	kg·ha <sup>-1</sup>
Vinaza <sup>-</sup> (EI, EII y EIII)		39,560	kg·ha <sup>-1</sup>
Vinaza <sup>-</sup> (EIV)		78,237.1	kg·ha <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (EI, EII y EIII)		1,444.82	kg CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (EIV)		2,246.42	kg CO <sub>2</sub>
Agua <sup>-</sup> (secado)		17,322.3	L
Pérdida de biomasa		7,218.4	kg
Residuos químicos neutralizados (pretratamiento)		265,289.22	kg
Efluentes (SFS)		3,036.03	L
H <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		0.108	kg
N <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		71,781.9	kg
O <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		7,182.61	kg
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		19,408.8	kg
Argón <sup>-</sup> (emisión al aire)		1,225.89	kg
Agua <sup>-</sup> (emisión al aire)		8,605.9	kg
CO <sup>-</sup> (emisión al aire)		5.425	kg
N <sub>2</sub> O <sup>-</sup> (emisión al aire)		0.056	kg
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		1.424	kg
NO <sup>-</sup> (emisión al aire)		282.6	kg
SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		2.311	kg
SO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		0.018	kg
HCN <sup>-</sup> (emisión al aire)		2.79E <sup>-10</sup>	kg
NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		2.12 E <sup>-15</sup>	kg
S <sup>-</sup> (emisión al aire)		6.61 E <sup>-13</sup>	kg
H <sub>2</sub> S <sup>-</sup> (emisión al aire)		7.87 E <sup>-12</sup>	kg
CH <sub>4</sub> <sup>-</sup> (emisión al aire)		2 E <sup>-18</sup>	kg
Cenizas <sup>+</sup> (EII)		559	kg
Vapor perdido <sup>-</sup> (EII)		28,189	kg
Vapor perdido <sup>-</sup> (EIII)		11,771	kg

<b>BALANCE DE ENERGÍA</b>		<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>Entrada</b>	Calor <sup>*</sup> (secado)	45,281	MJ
	Calor <sup>*</sup> (destilador EI, EII y EIII)	2,576.25	MJ
	Calor <sup>*</sup> (destilador EIV)	36,225.7	MJ
	Energía eléctrica requerida por el trapiche	1,948.55	MJ
	Energía eléctrica <sup>**</sup> (molino 1- EII y EIII)	17,586.7	MJ
	Energía eléctrica <sup>**</sup> (molino 2- EIV)	54,054.73	MJ
	Energía de reacción (pretratamiento, EIV)	47,536.21	MJ
	Energía de reacción (SFS, EIV)	17,029.75	MJ
	Energía eléctrica <sup>*</sup> (bomba para deshidratador; EI, EII y EIII)	4.06	MJ
	Energía eléctrica <sup>*</sup> (bomba para deshidratador; EIV)	2.64	MJ
<b>Salidas</b>	Calor generado <sup>*</sup> (EII y EIII)	201,404.87	MJ
	Calor perdido <sup>*</sup> (EII y EIII)	65,467.9	MJ
	Electricidad generada <sup>*</sup> (EII)	20,760.71	MJ
	Electricidad generada <sup>*</sup> (EIII)	61,720.79	MJ

<sup>\*</sup>Datos generados en el simulador de Aspen Plus 8.4v.

<sup>\*\*</sup>Datos obtenidos de [83].

### 3.2 Demanda acumulada de energía

La DAE para el escenario EI fue de 94,097.3 MJ, para los escenarios EII y EIII fue de 49,881.7 MJ y para el escenario EIV de 931,986.73 MJ. La figura 25 muestra las cantidades distribuidas en porcentajes, en esta se puede observar que el escenario EIV con un 83%, es el que más requerimientos de energía fósil necesita en su proceso.

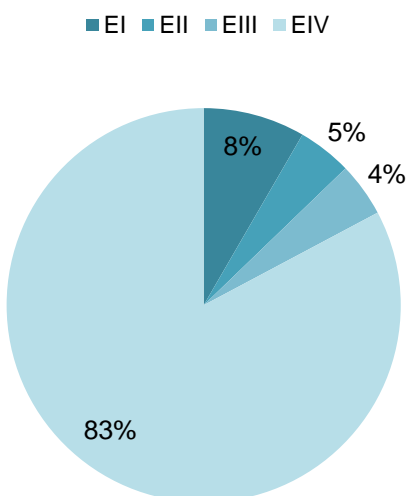


Figura 25. Requerimiento de energía no renovable para los diferentes escenarios.

Por otro lado, la figura 26 muestra la DAE para el escenario EI. En ella se puede observar que la destilación es el proceso en el que hay una considerable demanda de energía (47,020 MJ) correspondiente a un 49.9% del total de la DAE. Un 29.4% corresponde a la etapa agrícola, en la cual, la demanda de energía se debe a la energía necesaria para producir los insumos como fertilizantes y herbicidas, además del uso de diésel en la maquinaria agrícola. Estos resultados coinciden con lo publicado por [41, 57, 65, 74] en donde se menciona que una de las cantidades de energía primaria está destinada a estos insumos necesarios para el cultivo. Otro proceso que llama la atención es el tratamiento del bagazo, utilizando un 8.6% de la demanda de energía, esto se debe a que como el residuo no es utilizado en la planta, se necesitan cantidades altas de diésel para transportarlo hacia su destino de tratamiento/desecho. Otro 6.3% de la demanda energética corresponde al uso del trapiche para la extracción de jugo, un 2.1% para el transporte de los tallos hacia la planta de bioetanol y finalmente, la deshidratación del etanol contribuye solamente con 3.52% y la fermentación con un 0.15%.

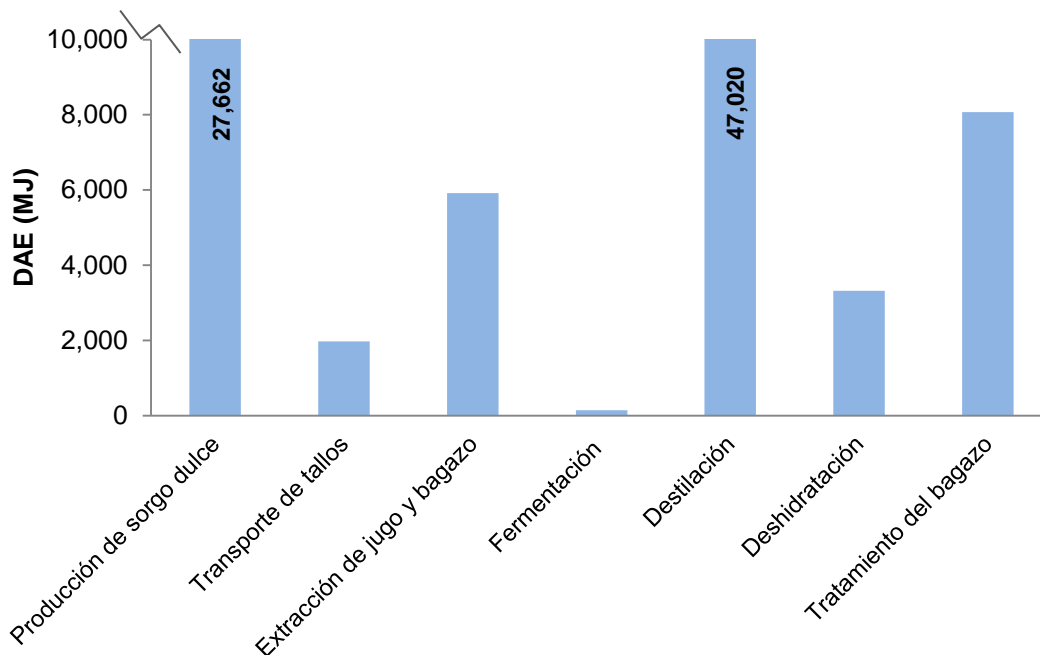


Figura 26. Demanda acumulada de energía (DAE) para el escenario E1.

En la figura 27 se presenta la DAE para los escenarios EII y EIII. Nuevamente la etapa agrícola y el proceso de la destilación son los que tienen la mayor demanda de energía acumulada con un 55.46 y 40.1% respectivamente, y tan sólo 3.95, 0.28 y 0.23% corresponden al transporte de los tallos, proceso de fermentación y combustión del bagazo.

En cuanto a la DAE para el escenario EIV (figura 28), los cálculos muestran que el proceso de pretratamiento químico tiene la mayor demanda acumulada de energía con un 59.12%. Esto se debe al proceso de producción de los reactivos químicos. A diferencia de Avila *et al.* [67], donde se menciona que el pretratamiento químico con ácido sulfúrico es el causante de las grandes cantidades de energía en uno de sus 3 escenarios, para este estudio el  $H_2O_2$  es el reactivo que necesita mayor cantidad de energía fósil para su producción [88]. Debido a que en la molienda se producen partículas pequeñas de biomasa, este proceso requiere de más potencia en el equipo, teniendo una DAE de 150,818 MJ que corresponde a un 16.18% del total de la energía requerida en este escenario.

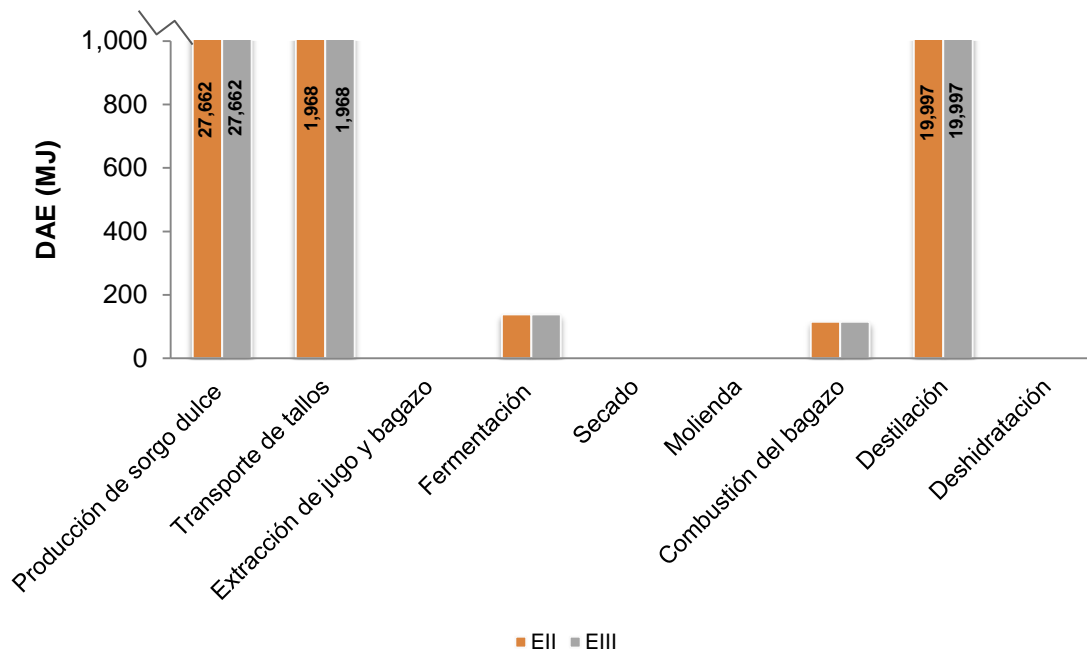


Figura 27. Demanda acumulada de energía para los escenarios EII y EIII

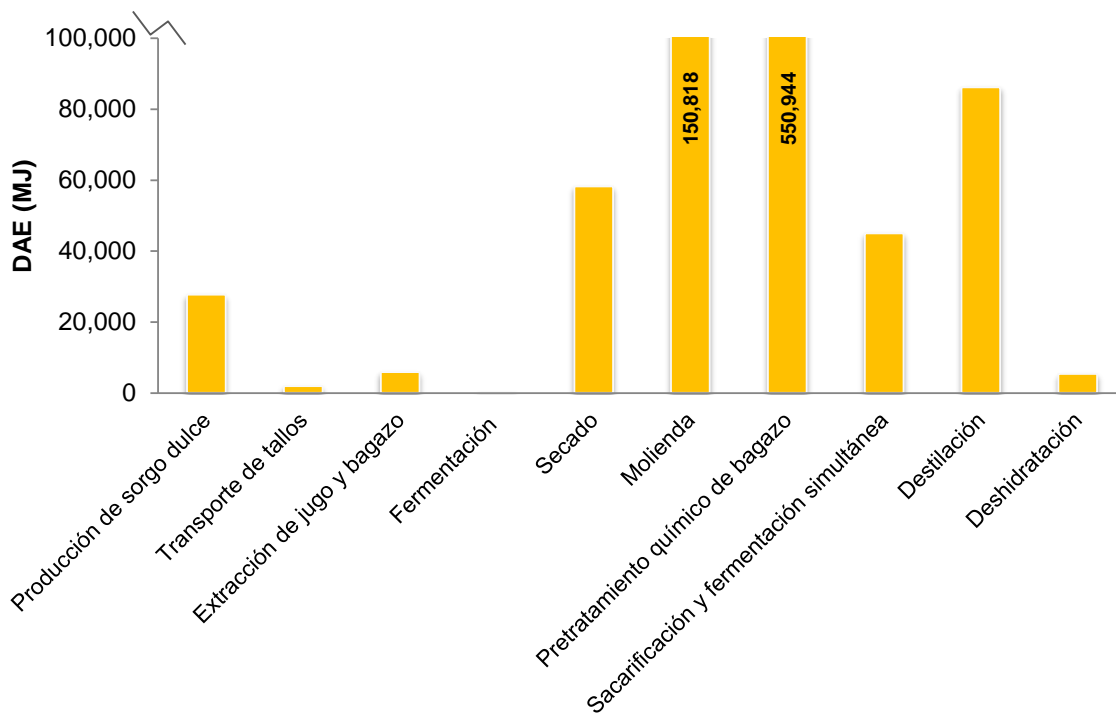


Figura 28. Demanda acumulada de energía para el escenario EIV

En el anexo 2 se encuentran los porcentajes correspondientes a la demanda acumulada de energía para cada uno de los escenarios propuestos.



### 3.3 Razón de energía fósil (REF)

En este trabajo, la cantidad de energía neta liberada por el biocombustible, es decir, su poder calorífico inferior, se consideró de  $26.95 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  [95], valor que multiplicado por la cantidad de bioetanol obtenido en cada escenario originó el valor de la energía producida ( $E_p$ ). En la tabla 14 se presenta la energía total que puede liberar el bioetanol y la energía fósil consumida para cada escenario (DAE), además de la energía generada en los escenarios EII y EIII por la combustión del bagazo. Estos datos sirvieron para el cálculo de la REF.

Tabla 14. Razón de energía fósil para cada escenario de producción de etanol a partir de sorgo dulce

	<b>Parámetro</b>	<b>MJ</b>	<b>MJ<sub>bioetanol</sub>/MJ<sub>fósil</sub></b>
<b>E I</b>	Energía producida( $E_p$ )	52,309,95	
	Energía consumida ( $E_c$ )	94,097.29	
	REF (razón de energía fósil)		0.56
<b>E II</b>	Energía producida( $E_p$ )	52,318.84	
	Energía excedente	1,222.82	
	Energía consumida ( $E_c$ )	49,881.76	
	REF (razón de energía fósil)		1.073
<b>E III</b>	Energía producida( $E_p$ )	52,318.84	
	Energía excedente	42,182.90	
	Energía consumida ( $E_c$ )	49,881.76	
	REF (razón de energía fósil)		1.89
<b>E IV</b>	Energía producida( $E_p$ )	83,366.44	
	Energía consumida ( $E_c$ )	931,986.73	
	REF (razón de energía fósil)		0.09

Se puede observar que los escenarios EI y EIV presentaron valores de REF por debajo de 1, por lo que se consideran escenarios que no contribuyen de manera positiva como energías alternativas, ya que exigen más energía fósil de la que son capaces de proveer. Como se vio anteriormente en la demanda acumulada de energía, el escenario EI requirió más energía en el proceso de la destilación, esencialmente por el tratamiento de los residuos, en este caso la gran cantidad de vinaza producida, que corresponde a un 95%

del total de mosto destilado. El escenario EIV, por los insumos requeridos en el proceso de pretratamiento químico, hace que se involucre gran cantidad de energía necesaria para su proceso; además del equipo de molienda, donde se requiere mayor potencia para obtener un tamaño de partícula de 1 mm y al igual que el escenario EI, el tratamiento de los residuos del proceso de la destilación.

Los escenarios EII y EIII, con 1.073 y 1.89  $\text{MJ}_{\text{bioetanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$  respectivamente, resultan viables, esto se debe a la energía generada por la cogeneración, donde además existe un excedente de energía eléctrica en el sistema. Este remanente de energía para el escenario EIII está sujeto al proceso de ciclo combinado, en el cual se utilizan dos turbinas que hacen más eficiente esta generación de electricidad. Para el caso de estos escenarios las necesidades de calor y electricidad en la etapa industrial son satisfechas por el mismo proceso de cogeneración, por lo que los requerimientos energéticos dentro de la planta no afectan a los escenarios. Sin embargo en la etapa agrícola sí se considera la energía necesaria para producir los insumos (fertilizantes y pesticidas) y la parte del tratamiento de los residuos de vinaza como se mencionó para el caso de los escenarios EI y EIV.

Investigaciones anteriores coinciden en que la cogeneración es una de las etapas esenciales para hacer sustentable cualquier proceso, sobre todo cuando se trata de opciones alternativas a los fósiles, como los biocombustibles, considerando el elevado consumo eléctrico de los procesos como el pretratamiento químico y la molienda [19]. A su vez, García *et al.* [57], analizando diferentes escenarios, concluyen que al obtener el bioetanol directamente del jugo y la generación de energía con el bagazo de caña de azúcar, el proceso es energéticamente rentable con un valor de REF de 4.8  $\text{MJ}_{\text{ethanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$ . Este valor es tres veces más alto, en comparación con el escenario EIII de este trabajo, lo cual podría deberse a que en el proceso se contempla una gran cantidad de energía en el tratamiento de sus residuos derivados en la fase agrícola y fase industrial y el estudio de [57] no contempla el tratamiento de los residuos.

Cai *et al.* [74], suponen que la combustión del bagazo de sorgo dulce proporciona calor y energía suficiente para el proceso de obtención de bioetanol con el jugo; lo que no requiere ninguna energía externa. En su trabajo obtienen una REF para el escenario de etanol-jugo y cogeneración-bagazo de 4.7  $\text{MJ}_{\text{ethanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$  y para el escenario de etanol-

jugo y bagazo de  $3.6 \text{ MJ}_{\text{ethanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$ . El valor del escenario de etanol-jugo y bagazo puede deberse a que utilizan otra porción de bagazo para cogeneración, además de la lignina una vez separada de la celulosa. Sus residuos sirven principalmente para alimento de ganado.

Lo más factible para estos procesos en los que se pretende producir bioenergía es buscar alternativas a los residuos, tal como el trabajo de Cherubini *et al.* [12], en donde presentan una propuesta de biorefinería para el switchgrass, obteniendo además de bioetanol, bioenergía (biometano, calor, electricidad) y productos químicos (fenoles). Con esto podría asegurarse un valor superior al  $1.89 \text{ MJ}/\text{MJ}$  de REF en este trabajo.

Es subjetivo comparar los estudios de ACV, debido a que las condiciones estimadas son muy diferentes, principalmente por las condiciones geográficas, los rendimientos tanto de la etapa agrícola y de la etapa industrial. Además de la metodología utilizada y las categorías de impacto que se deseen evaluar.

### **3.4 Impactos ambientales**

#### **3.4.1 Emisiones generadas en la etapa agrícola**

En la figura 29 se muestran las emisiones que se generaron en la fase agrícola de los 4 escenarios, haciendo referencia al agua subterránea, aire y suelo. La emisión más alta con respecto al aire es el  $\text{CO}_2$  con 88.23% respecto al total de las emisiones para el aire; este gas es generado en la producción de los fertilizantes agrícolas. Otro de los gases con emisiones notorias en el aire es el amoníaco con el 10.24%, su emisión se vincula principalmente a la pérdida de nitrógeno en la atmósfera al aplicar  $\text{NH}_3$  como fertilizante en el área de cultivo [96, 97].

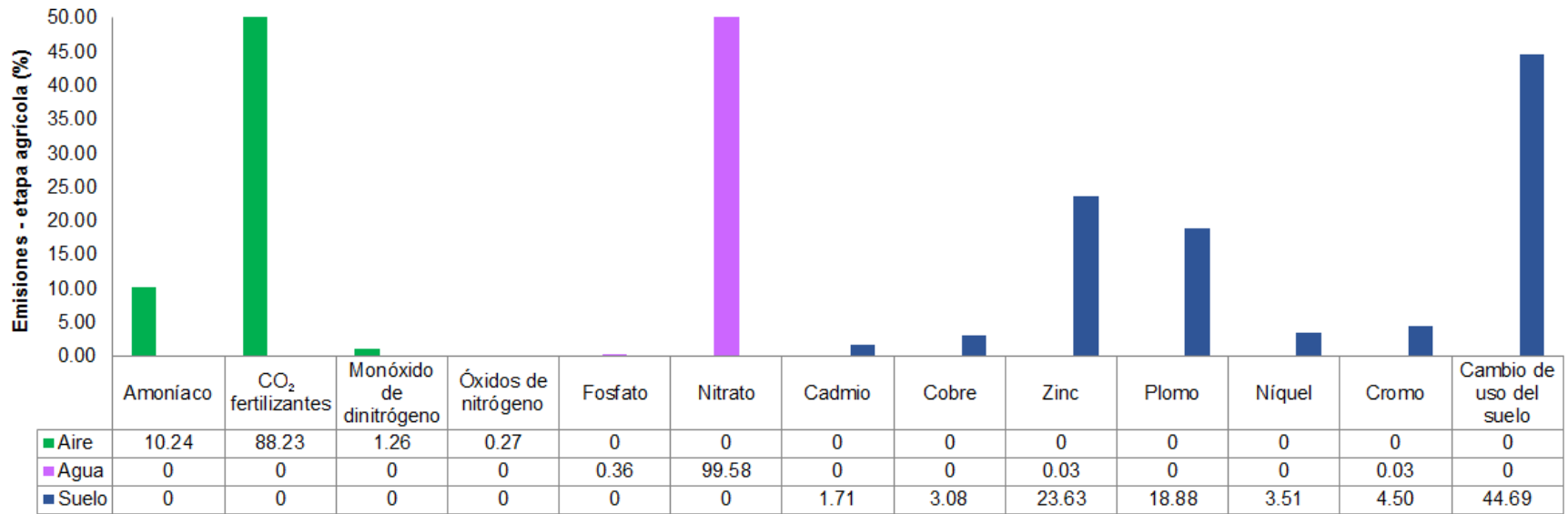


Figura 29. Emisiones correspondientes a la etapa agrícola

Con respecto a las emisiones al agua, tenemos que el nitrato es la más alta con el 99.58% del total de ellas. Esto se debe básicamente al uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, que regularmente son arrastrados por el agua de lluvia o riego a las aguas subterráneas, y como lo menciona Prieto *et al.* [98], estos efectos también pueden contribuir a la eutrofización y acidificación de estos cuerpos de agua.

Las emisiones al suelo se hacen visibles principalmente para el cambio de uso de suelo (CUS) con 44.7% del total de las emisiones, debido al desarrollo de nuevas tierras de cultivo en tierras antes no cultivadas (como los pastizales), ya que al cambiar la utilización de la tierra, estas agrupaciones de almacenamiento van a cambiar hasta que se alcance un nuevo equilibrio [12, 57, 99]. Las emisiones de metales pesados como Zinc y Plomo con 26.63 y 18.88% respectivamente, se pueden deber al riego con aguas negras, uso de fertilizantes inorgánicos, lluvia ácida principalmente, los cuales en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, organismos del suelo, plantas y animales [98, 100].

### **3.4.2 Emisiones generadas en la etapa industrial**

Para el cálculo de CO<sub>2</sub> en el proceso de la fermentación de jugo se consideró el rendimiento de 47.43 g·L<sup>-1</sup>, obtenido por Franco [80], este para todos los escenarios. Así se pudo calcular la formación de 45.663 g CO<sub>2</sub> por litro de mosto durante la fermentación. En total se producirían 1,444.8 kg CO<sub>2</sub> por ciclo de producción de etanol.

Para el escenario EIV se tomó además el rendimiento de etanol obtenido a partir del bagazo por Equihua [81]. El cálculo se llevó a cabo de la misma manera como se mencionó anteriormente, con la única diferencia del rendimiento, el cual fue de 27.97 g·L<sup>-1</sup>. La emisión de CO<sub>2</sub> para este caso fue de 801.6 kg CO<sub>2</sub>.

El programa Aspen Plus 8.4v se utilizó para estimar las emisiones al aire con respecto a la combustión del bagazo, éstas se encuentran ubicadas en la tabla del inventario (tabla 13) como emisiones al aire.

Ambas emisiones, tanto del proceso de fermentación como el de combustión formaron parte del inventario necesario para calcular los impactos potenciales por categoría de impacto en el programa SimaPro.

### **3.4.3 Impactos ambientales potenciales por categoría**

En la figura 30 se presentan los impactos potenciales por categoría. El escenario EI se presenta como referencia de 100% para poder comparar los demás escenarios.

Se puede observar que los escenarios EI, EII y EIII están muy por debajo del escenario EIV, debido a que en este último, los valores altos en los impactos corresponden a las emisiones generadas por el proceso de pretratamiento químico, correspondiendo a la producción de los insumos, particularmente del peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio (como sucedió con la demanda de energía fósil, DAE). En cuanto a los impactos potenciales para los escenarios EI, EII y EIII se considera que el potencial de eutrofización (PE) aporta emisiones altas en la etapa agrícola y el potencial de calentamiento global (PCG) junto con el potencial de toxicidad humana (PTH) en la etapa industrial

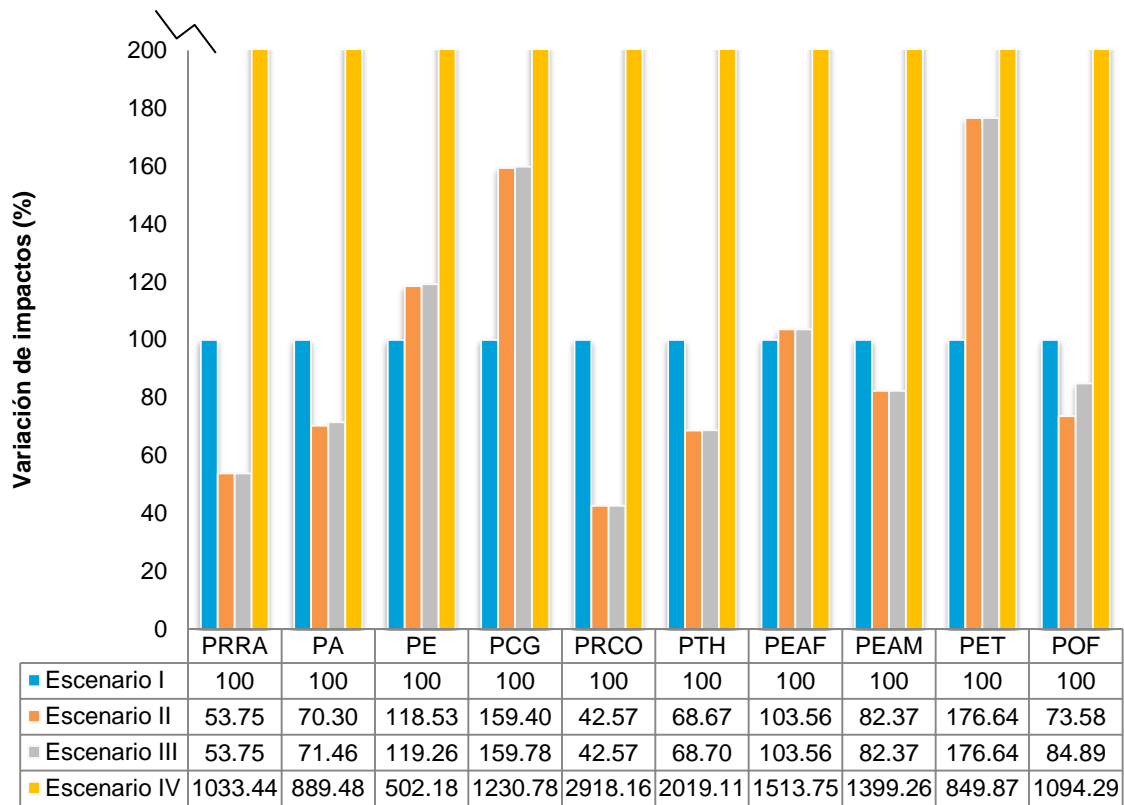


Figura 30. Emisiones generadas por MJ de etanol obtenido para cada escenario.

De manera particular, en las figuras 31, 32, 33 y 34 se muestran los porcentajes correspondientes a cada categoría de impacto potencial para cada escenario, calculados por el programa SimaPro. En cada una de ellas se muestran los cálculos de las emisiones generadas en los procesos de cultivo, transporte y conversión a bioetanol.

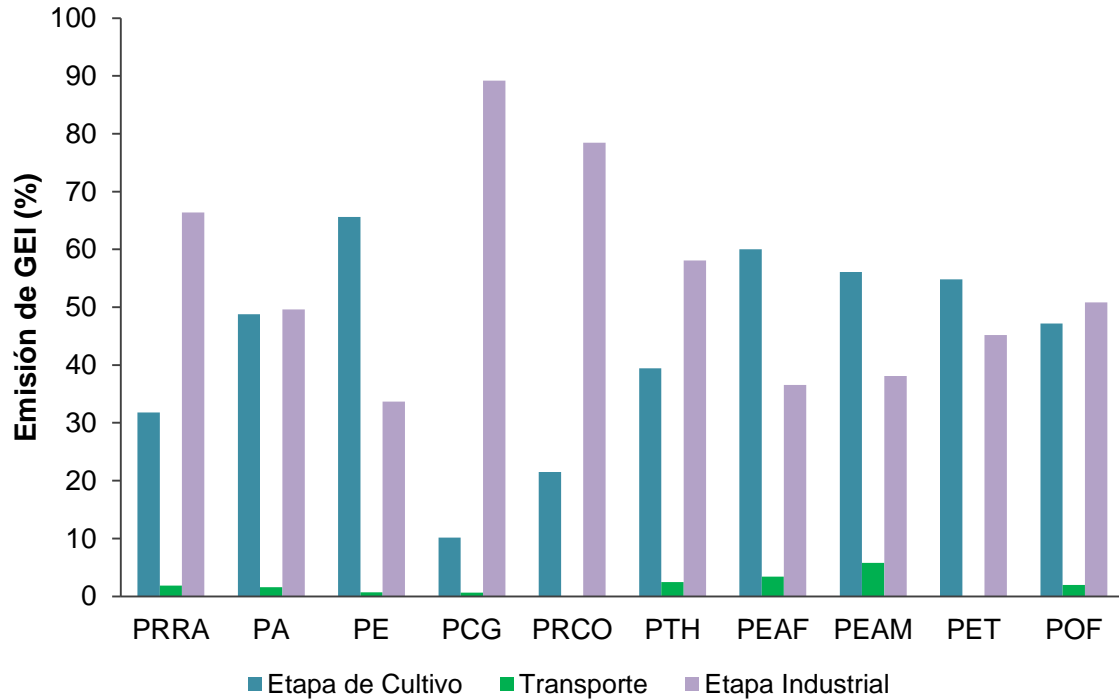


Figura 31. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EI.

En la figura 31 se puede observar que los impactos más importantes están asociados a la etapa industrial, seguido de la etapa de cultivo y finalmente la etapa de transporte. En la fase de cultivo, los impactos más importantes fueron para el potencial de eutrofización (PE) con 65.6%, el potencial de ecotoxicidad de agua fresca (PEAF) con 60% y el potencial de ecotoxicidad de agua marina (PEAM) con 56.11%. Las categorías de impactos más sobresalientes en la etapa industrial fueron: la de potencial de calentamiento global (PCG) con 89.2%, el potencial de reducción de la capa de ozono (PRCO) con un porcentaje del 78.4% y el potencial de reducción de los recursos abióticos (PRRA) con 66.37%. Para el transporte los impactos presentaron valores por debajo del 6%.

Las emisiones derivadas de los fertilizantes en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$  en el aire, así como las afectaciones al suelo por volatilización de  $\text{NH}_3$ , nitrógeno y fosfato son los mayores contribuyentes a este tipo de emisiones en la etapa agrícola. Wang, *et al.* [72] reportaron que el PE representa la eutrofización de los ecosistemas como ríos y lagos y que en las aguas superficiales es particularmente grave porque puede conducir a la proliferación de algas y consumo de oxígeno, evitando el desarrollo de los ecosistemas acuáticos.



Particularmente para Tizimín Yucatán, que fue el área de cultivo de sorgo dulce en esta investigación, esta categoría podría afectar a los ecosistemas de agua subterránea (cenotes), donde muchos de ellos tienen conexión a la zona costera y a la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos. El PEAf y el PEAM contribuyen negativamente al impacto ambiental con emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub> (partículas como ceniza, polvo, hollín) que se dispersan en la atmósfera causando daños a la salud humana, estas se deben principalmente al uso de herbicidas y fertilizantes [12, 41, 68]. Otro factor identificado en el PEAM es el de la irrigación, ya que el agua podría conducir al arrastre de sustancias químicas por la aplicación de fertilizantes y pesticidas.

En el potencial de calentamiento global (PCG) las emisiones de CO<sub>2e</sub> están relacionadas con el uso de combustibles fósiles, en este caso, durante los procesos de extracción del jugo, destilación y tratamiento de los residuos, incluido el bagazo, ya que en este escenario no se le da ninguna utilidad. El potencial de reducción de la capa de ozono (PRCO), representa la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera por las emisiones antropogénicas de sustancias que agotan el ozono. En este trabajo los gases se vinculan a los emitidos en el tratamiento de los residuos derivados del proceso de la destilación (vinazas). El potencial de reducción de los recursos abióticos (PRRA) se relaciona con el agotamiento de insumos y energía. Particularmente, en este estudio se relaciona con las necesidades de calor para el tratamiento de las vinazas [88]. Steen [101], menciona que después de la reducción de la capa de ozono, la reducción de los recursos abióticos es considerada una de las amenazas ambientales potenciales, ya que esta es inevitable.

Las emisiones por el transporte de la materia prima (tallos de sorgo dulce) en este trabajo contribuyen de manera insignificante, debido a la distancia contemplada de 10 km. García *et al.* [57], mencionan que sus emisiones en esta etapa son del 15.04%, sin embargo ellos consideran una distancia de 87.2 km para las condiciones de México.

En la figura 32 se puede observar que los impactos para el escenario EII están vinculados con la fase de cultivo y producción de bioetanol. El porcentaje más alto para la etapa agrícola se obtuvo para el potencial de acidificación (PA) con 69.39%, seguido del PEAM y potencial de oxidación fotoquímica (POF) con 68.12 y 64.15 % respectivamente. Respecto a la etapa industrial, el mayor impacto es para el PCG con un 90.2% y con

68.96 % al potencial de ecotoxicidad terrestre (PET). Los porcentajes de emisión para la etapa de transporte se encontraron por debajo del 7%.

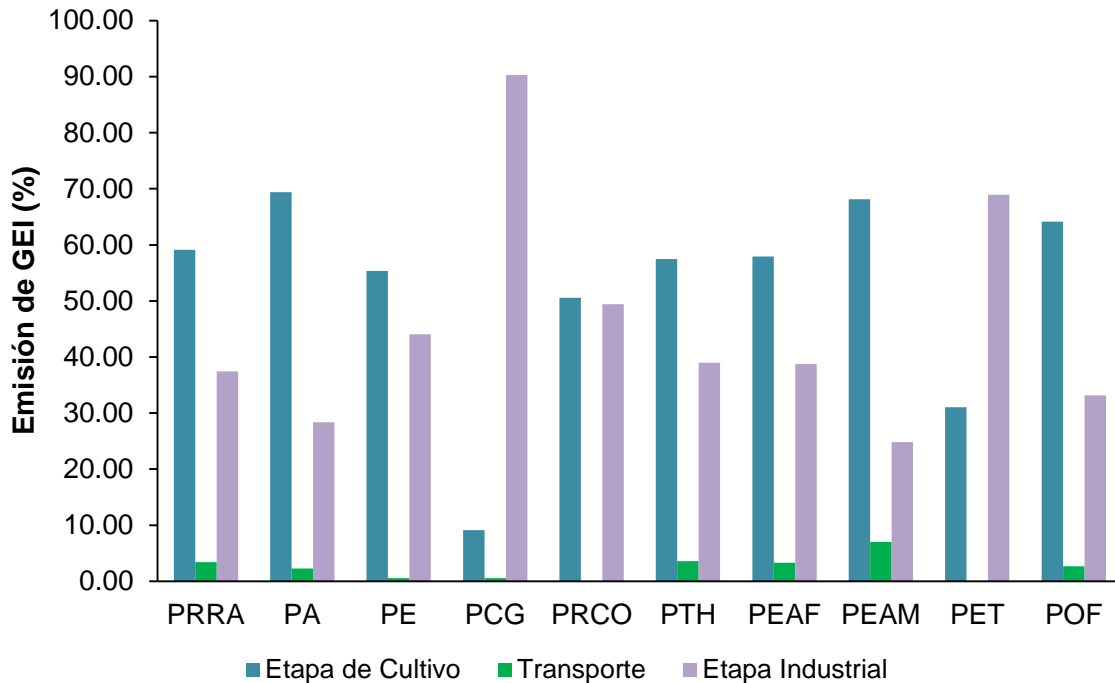


Figura 32. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EII.

Como se mencionó anteriormente en el tema de las emisiones agrícolas de este trabajo (tema 3.4.1.), el PA se asocia al uso de los fertilizantes nitrogenados, liberando principalmente (por volatilización) el  $\text{NH}_3$ . Los impactos para PEAM se asocian a las emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , herbicidas y metales pesados, como se mencionó anteriormente para el escenario EI. El POF como indicador de las emisiones de etileno equivalente ( $\text{C}_2\text{H}_{4\text{eq}}$ ), señalan emisiones que se generan en la producción de los fertilizantes principalmente. García *et al.* [57], Wang *et al.* [41] identificaron variables de impacto en las emisiones de GEI involucrado la producción de fertilizantes. La mayoría de estos valores corresponden a emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  durante su fabricación.

Las emisiones de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  referentes al PCG en el escenario EII, se ven vinculadas con el proceso de combustión del bagazo, ya que los gases se liberan directamente a la atmósfera, estos podrían contribuir a la formación de lluvia ácida. El PET se caracteriza por contribuir con emisiones referentes a la generación de vapor, también en el proceso de combustión. Wang *et al.* [41] mencionan que las emisiones por el PET son generadas en su etapa industrial por la generación de vapor, al quemar energía fósil, además de que

esto contribuye con efectos negativos para la salud humana, ellos obtienen un porcentaje de 64.31%.

Las emisiones generadas en el escenario EIII se muestran en la figura 33 y estas también se asocian a la etapa de cultivo y a la etapa industrial. Los potenciales de PA y PEAM son los más altos con 68.27 y 68.12% respectivamente, para la etapa de cultivo. En cuanto a la etapa industrial, las emisiones son similares a las del escenario EII con 90.28% para PCG y 68.9% para PET. Las causas de impacto ambiental podrían considerarse ser iguales, debido a que estos son procesos con el mismo fin, la generación de bioelectricidad.

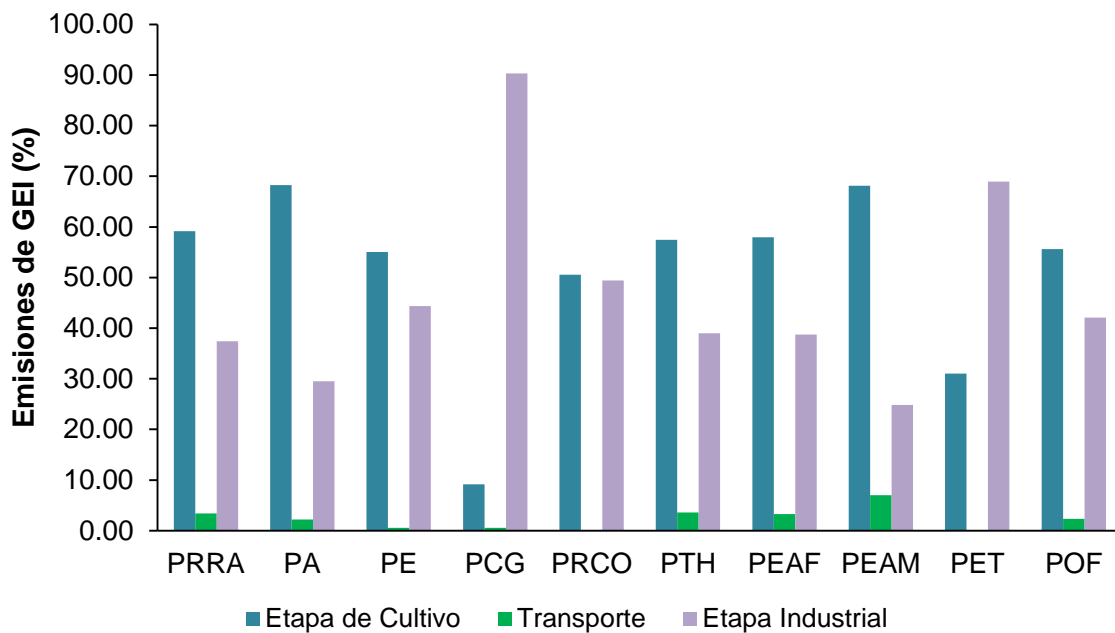


Figura 33. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EIII.

La figura 34 muestra que para el escenario EIV los impactos potenciales más altos se encuentran en la fase industrial, es decir la conversión de los tallos completos (jugo y bagazo) a bioetanol. Casi todos los potenciales presentan valores arriba de un 90%, excepto la categoría de PE con un 86.7%. Así pues, se tiene que el PRCO es el valor más alto con un 99%, seguido de PTH con un 98% y finalmente el PRRA con un 97%. En la fase de cultivo se calcularon porcentajes de atribución menores al 13% y menores al 1% la fase de transporte.

Los porcentajes por arriba del 90% se deben principalmente al proceso de pretratamiento químico. Con el SimaPro se pudo distinguir que las grandes emisiones se asocian a la producción de los insumos químicos, como el peróxido de hidrógeno, el hidróxido de sodio y ácido sulfúrico. Además, se asocia el uso de gas natural para la combustión y generación de vapor, y así cubrir las necesidades de la planta, ya que hay que recordar que en este escenario no se está haciendo uso de ningún tipo de residuo para cogeneración. Otro punto clave es el tratamiento de los residuos, tanto del bagazo como el de las aguas residuales (ver anexo 3).

En cuanto al PE, en la fase de cultivo representa la eutrofización de los ecosistemas en aguas subterráneas, como se mencionó también para el escenario EI. En los anexos 4a, 4b y 4c se puede visualizar los valores para cada categoría de impacto arrojados por el programa de SimaPro v8.0.

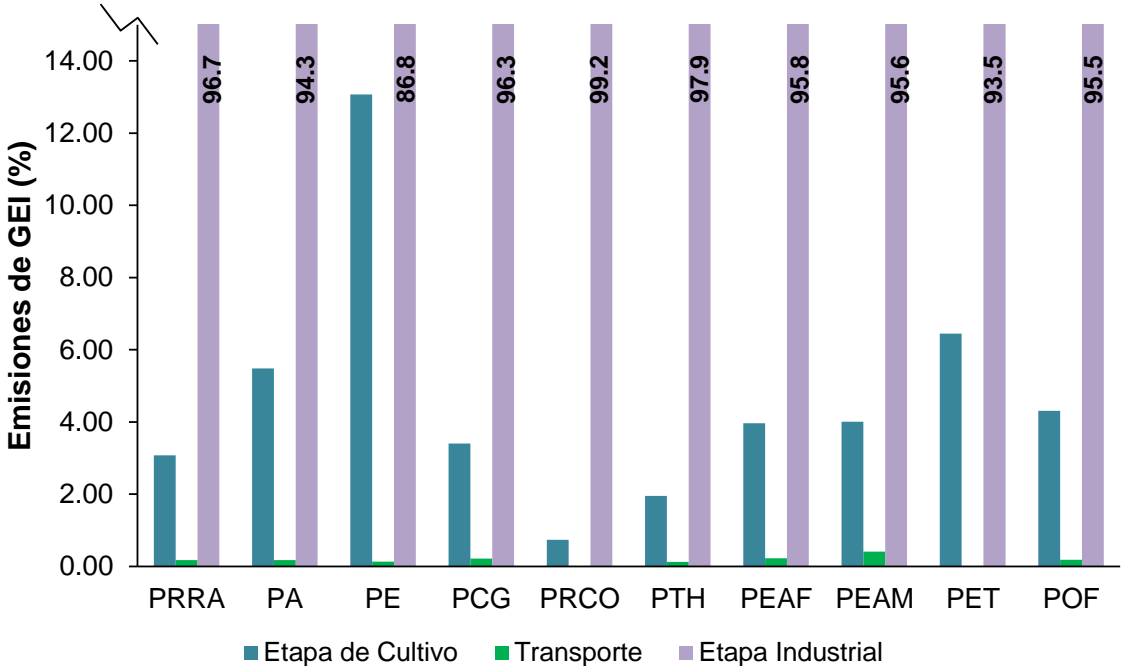


Figura 34. Emisiones generadas por categoría de impacto, para el escenario EIV.

### 3.5 Mitigación de gases de efecto invernadero

La contribución a la mitigación o reducción de los GEI de los escenarios estudiados en este trabajo se muestra en la figura 35. En las barras verticales se pueden ver los valores de reducción que sobre pasan el eje, y en la parte inferior de este gráfico se presentan los

valores de referencia en kilogramo de emisión por categoría para cada escenario y sistema de referencia fósil.

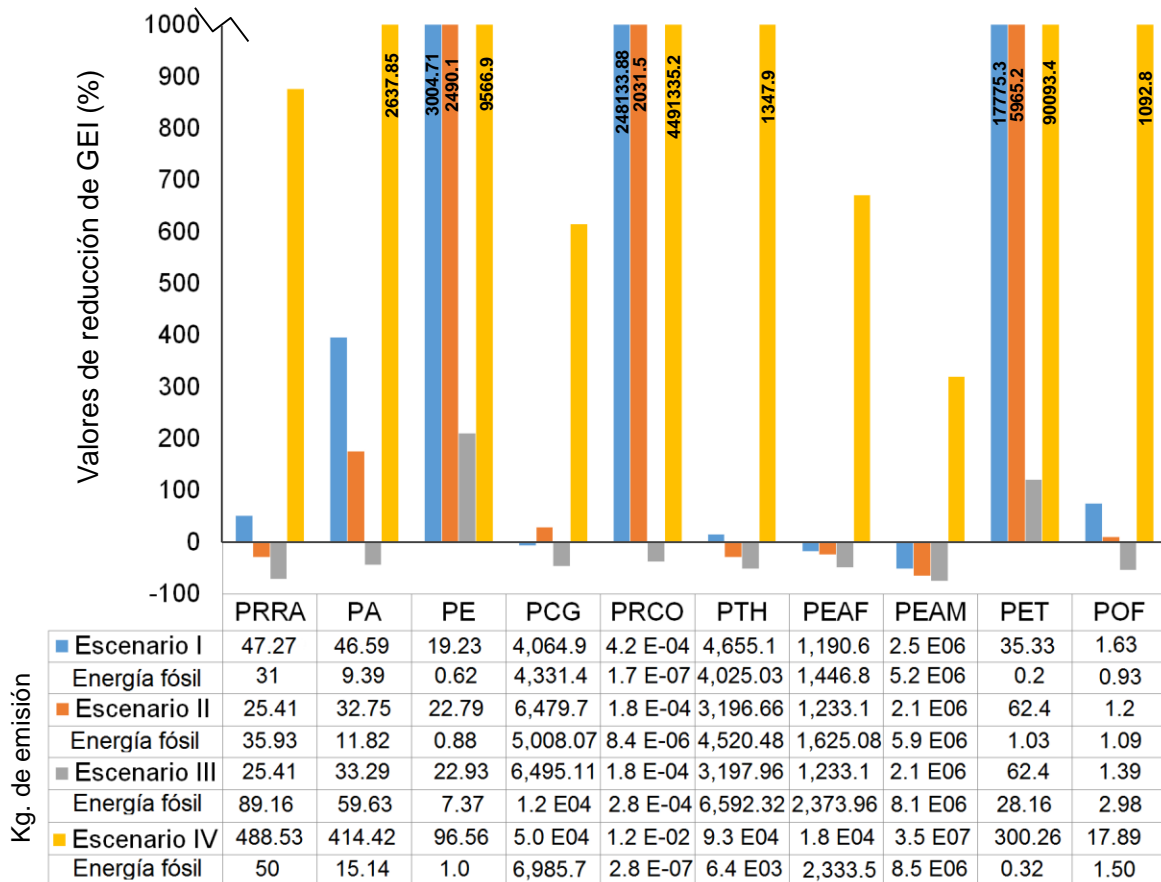


Figura 35. Valores de reducción de emisiones de GEI de los escenarios, tomando un sistema de referencia fósil.

Los valores de reducción positivos no cumplen con una reducción benéfica para el ciclo de vida del proceso. En este caso, se tiene que el escenario EIII es el que cumple con el rango de reducción en casi todas las categorías de impacto, teniendo a la gasolina y electricidad convencional con valores arriba del 60% con respecto a los valores del escenario EIII. Este beneficio ambiental se debe principalmente al uso integral de la bioenergía producida. En cuanto a las emisiones de PE y PET para este mismo escenario, se observa que están por arriba del 65% con respecto a los fósiles, las causas se deben a la etapa de cultivo y a la etapa de combustión principalmente.

El otro escenario que llama la atención, pero este por no contribuir a ninguna reducción es el escenario EIV. En todas sus categorías de impacto se encuentra por arriba de la

gasolina, y es que este proceso estima muchas emisiones en la etapa de cultivo, incluyendo el cambio de uso de suelo, herbicidas y fertilizantes, y la generación de residuos derivados principalmente del pretratamiento químico y destilación en la fase industrial.

## CONCLUSIONES

- Esta investigación proporciona nuevos conocimientos sobre el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida a partir de cuatro vías de producción de bioetanol a partir del tallo de sorgo dulce en el Estado de Yucatán.
- El planteamiento de escenarios para el sorgo dulce cultivado en el Estado de Yucatán nos permitió visualizar la mejor alternativa para su aprovechamiento integral. Resultando como las mejores opciones los escenarios EII y EIII, con la producción de bioetanol a partir de jugo del tallo y la combustión del bagazo como generador de energía.
- La demanda acumulada de energía resultó muy elevada para el escenario EIV con 931,986.73MJ y aunque el escenario EI obtuvo un valor 10 veces menor, éste no logró una Razón de Energía Fósil mayor a 1, por lo que estos escenarios no cumplen hasta el momento como una opción redituable energéticamente, sin embargo para el escenario EIII resultó de  $1.89 \text{ MJ}_{\text{bioetanol}}/\text{MJ}_{\text{fósil}}$ , lo que indica que es mayor la cantidad de energía renovable obtenida que la energía fósil requerida en el proceso.
- En los escenarios EI, EII y EIII la etapa agrícola y la destilación coincidieron con el mayor uso de energía fósil, esto debido al tratamiento de las vinazas y a la producción de insumos para el proceso de cultivo de sorgo dulce. Sin embargo para el escenario EIV la mayor cantidad de energía fósil invertida es para el proceso de pretratamiento químico, ya que en este hay una gran cantidad de residuos que deben tratarse, además de la que debe invertirse en el mismo proceso.
- Los impactos generados en la fase agrícola demuestran que sus emisiones al aire se deben principalmente a la producción de los fertilizantes, las emisiones al agua se debieron a los escurrimientos de fertilizantes nitrogenados que pueden causar daño a los mantos de agua subterránea, para el caso de Yucatán; así también los

daños al suelo por metales pesados como el Zinc y Plomo, presentes en los fertilizantes.

- Los mayores impactos ambientales se evidencian para el escenario EIV, ya que los escenarios EI, EII y EIII se encuentran por debajo del 50% de emisiones en comparación con éste. Para los escenarios EI y EII resultó ser la etapa agrícola la causante de las mayores emisiones, originando posibles daños en la categoría de PE, PA y PET.
- El escenario más favorable para la reducción de gases de efecto invernadero con respecto a los combustibles fósiles resultó ser el escenario EIII con reducciones negativas en la mayoría de las categorías de impacto.



## PERSPECTIVAS

- Se sugiere continuar con la generación de información datos de las fases agrícola y de producción, bajo las condiciones del Estado de Yucatán, para sustituir los valores que se tomaron de la literatura.
- El planteamiento del uso de la biomasa que se pierde en el pretratamiento químico del bagazo (62%), podría contribuir de manera favorable para el escenario EIV mediante la generación de energía, y que ésta se retorne al proceso, como fue el caso de la cogeneración con el bagazo de los tallos.
- Se recomienda hacer el análisis con los equipos óptimos para cada etapa de los diferentes escenarios, principalmente del trapiche y del molino.
- Aunque el escenario EIV resultó muy poco favorable, tanto en la estimación energética como en la ambiental, es importante considerar la posibilidad de seguir trabajando en la investigación de nuevos métodos para el pretratamiento del bagazo (antes de la sacarificación) y así conseguir un mejor rendimiento de bioetanol y menos impactos, tanto energéticos como ambientales.
- Es recomendable estudiar la reutilización de la vinaza, ya que este residuo representa hasta un 90% del total del mosto en el destilador. Se puede producir energía y así contar con una mejor eficiencia energética y desempeño ambiental del proceso, tal como se ha sugerido en la literatura [41, 74]. Otro proceso que se considera viable para la utilización de las vinazas es considerar la irrigación, donde este proceso consiste en la aspersion de la vinaza en el área de la plantación con algunos residuos sólidos descompuestos ricos en nutrientes [68] sin llegar a la eutrofización. También se ha propuesto que el concentrado de las vinazas provenientes de la destilación y de las lías de fermentación son ricas en proteínas y fibra, y estas podrían utilizarse como una opción para alimento animal, sin embargo es importante considerar las características de las vinazas que se obtengan, para tener la seguridad de que no es tóxica.

- Los resultados de este Análisis de Ciclo de Vida pueden verse afectados por la incertidumbre, por la metodología, límites del sistema o los métodos de evaluación de impacto ambiental, así como la calidad de los datos disponibles. Por esta razón es necesario un análisis de sensibilidad para el fortalecimiento de este trabajo.
- Con la finalidad de hacer cualquier proceso biotecnológico sustentable, se considera conveniente la realización de un estudio de viabilidad económica, principalmente para incrementar el interés en el desarrollo de plantaciones de sorgo dulce, como materia prima para la producción de bioetanol.

## REFERENCIAS

1. FAO, Bosques y Energía cuestiones clave, 2008.
2. M. Xu; T. Zhang; S. Liang, Unintended consequences of bioethanol feedstock choice in China, *Bioresource Technology*. 125, 312–317, 2012.
3. Banco Mundial, América Latina, pionera en leyes sobre cambio climático. 2013. Available from: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/04/12/America-Latina-pionera-en-leyes-sobre-cambio-clim-225-tico>
4. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaria General y Secretaria de Servicios Parlamentarios, Ley General de Cambio Climático, México D.F., Diario Oficial de la Federación. 2012; 1-44,
5. Secretaría de Energía, Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos, 2013-2027, México. 2013; 50-53.
6. International Energy Agency, REN21. 2012, Renewables 2012 Global Status Report. París. 2012; 20-22.
7. M. Prehn; I. Cumana, La bioenergía en México: estudios de caso, Cuaderno temático No. 1, Red Mexicana de Bioenergía A.C. 2010; 3-28.
8. L.P. Koh; J. Ghazoul, Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities, *Biological Conservation*. 141, 2450–2460, 2008.
9. A. Bernardina, The influence of biofuels, economic and financial factors on daily returns of commodity futures prices, *Energy Policy*. 69, 227-247, 2014.
10. F. Manzinia; O. Maserá; J. Islas, A prospective study of bioenergy use in Mexico, *Energy*. 32, 2306–2320, 2007.
11. R. Pichs M; Y. Sokona; K. Seyboth; P. Matschoss; S. Kadner; O. Edenhofer, Special report on renewable energy sources and climate change mitigation, Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Chang, IPCC, New York. 2011, 6-18.
12. F. Cherubini; G. Jungmeier, LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass, *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 15, 53–66, 2010.
13. SENER, Inventario Nacional de Energía Renovable. 2015. Available from: <http://inere.energia.gob.mx/publica/version4.2/>
14. SENER, Prospectiva del Sector Eléctrico, 2013-2027, México, 2013, p. 230.

15. SENER, Estrategia Nacional de Energía 2013-2027, México, 2013, p. 73.
16. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaria General y Secretaria de Servicios Parlamentarios, Ley de promoción y desarrollo de los Bioenergéticos. Centro de Documentación, México D.F., Diario Oficial de la Federación. 2008, p. 12.
17. O. Maserá; F. Coralli; C. García; E. Riegelhaupt; T. Arias; J. Vega; R. Díaz; G. Guerrero; L. Cecotti, La bioenergía en México, situación y perspectivas, Cuaderno temático No. 4, Red Mexicana de Bioenergía A.C. 2011, 7-15.
18. Banco Mundial, Consumo de energía procedente de combustibles fósiles. 2014. Available from: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>
19. Intelligent Energy Europe & Sweethanol, Difusión de un modelo sostenible en la UE para producir etanol de 1ª generación a partir de sorgo dulce en plantas descentralizadas, UE. 2011, 9-19.
20. T.H. Regassa; C.S.Wortmann, Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature. Biomass and bioenergy. 64, 348-355, 2014.
21. D. L. Klass, Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals, 1st Ed.; Academic Press, USA, 1998, p. 651.
22. C. M. Drapcho; N. P. Nhuan; T. H. Walker, Biofuels Engineering Process Technology; McGraw-Hill, USA, 2008, p. 448.
23. SENER, Etanol anhidro como biocombustible, 2014. Available from: <http://www.energia.gob.mx/portal/Default.aspx?id=2926>
24. C. Chuck; E. Pérez C; E. Heredia; S.O. Serna, Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México, tecnologías, avances y áreas de oportunidad, Revista Mexicana de Ingeniería Química. 10, 529-549, 2011.
25. A. Bell; G. Michelena; M. Ramil M; M. Viñals, Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). 46, 7-16, 2012.
26. B. E. Dale; K. Seungdo, Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. Biomass and Bioenergy. 29, 426-439, 2005.
27. P. Mizsey; L. Racz, Cleaner production alternatives: Biomass utilization options, Journal of Cleaner Production. 18, 767-770, 2010.

28. J. Sánchez; I. Montoya; A. Quintero; A. Cardona, Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz, *Scientia et Technica*. 28, 187-192, 2005.
29. S. González-García; B. Mola-Yudego; J. Murphy, Life cycle assessment of potential energy uses for short rotation willow biomass in Sweden, *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18, 783–795, 2012.
30. T. Martínez; F. Murrieta; J. Aburto, Evaluación técnico-económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, *Tecnología, Ciencia, Educación, Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*. 23, 23-30, 2008.
31. Renewable Fuels Association, World Fuel Ethanol Production, 2015. Available from: <http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/>
32. B. Reddy; P.Reddy, Sweet Sorghum: Characteristics and Potential, *International Sorghum Millets Newsletter*. 44, 26-28, 2003.
33. M. Cordovés; G. Delgado; G. Bueno, Sorgo dulce: sus potencialidades productivas, ICIDCA, Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 43, 15-21, 2009.
34. F.J. Dávila-Gómez; C. Chuck-Hernández; E. Pérez-Carrillo; W.L. Rooneyb; S.O. Serna-Saldivar, Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench), *Industrial Crops and Products*. 33, 611-616, 2011.
35. A. Monti; L. W. Zegada, Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock?, A review on field management practices, *Biomass and Bioenergy*. 40, 1-12, 2012.
36. A. Almodares; M. R. Hadi, Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 4, 772-780, 2009.
37. I.L. Peniche, Evaluación de cuatro variedades de sorgo dulce para la producción de bioetanol en el oriente de Yucatán, México, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., México, 2012, p.132.
38. M. M. Machado C., Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe, Organización Latinoamericana de Energía e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Brasil, 2010, p. 114.
39. K. Suresh; B.S. Vijay; M. Pallavi; V. Komala; N.Seetharama; V. Ratnavathi, Study

- on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice, *Biomass and Bioenergy*. 34, 947-952, 2010.
40. SAGARPA, Bioenergéticos. 2012. Available from: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/produccion-a-partir-de-sorgo-dulce.html>
  41. M. Wang; Y. Chen; X. Xia; J. Li; J. Liu, Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis, *Bioresource Technology*. 163, 74-81, 2014.
  42. N. Montes; J.R. Salinas; A. González; R. Loredo; G. Díaz, Guía técnica de producción de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en Tamaulipas, INIFAP-Centro de Investigaciones Regional del Noroeste, Campo Experimental Río Bravo, México, 2010, p. 46.
  43. Ch. Sun; R. Liu; R. Yin; X. Wu; W. Cao, Comparison of the effects of five pretreatment methods on enhancing the enzymatic digestibility and ethanol production from sweet sorghum bagasse, *Bioresource Technology*. 111, 215-221, 2012.
  44. N. Montes; V. Pecina; M. E. Cisneros; M. A. García, RB CAÑERO: sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para la producción de etanol, INIFAP- Centro de Investigaciones Regional del Noroeste, Campo Experimental Río Bravo, México, 2010, p. 41.
  45. T. Zhang; J. Zhong; X. Zhang; T. Tan; J. Yu, Biorefinery of sweet sorghum stem, *Biotechnology Advances*. 30, 811-816, 2012.
  46. M. S. Chinn; M. W. Veal; M. B. Whitfield, Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products, *Industrial Crops and Products*. 37, 362-375, 2012.
  47. K. R. Caffrey; M. W. Veal; M. S. Chinn, The farm to biorefinery continuum: A techno-economic and LCA analysis of ethanol production from sweet sorghum juice, *Agricultural Systems*. 130, 55-66, 2014.
  48. R.A. Guajardo; G. Medina; I. Sánchez; J. Soria; J. M. P. Vázquez; J. A. Quijano; F. Legorreta; J. A. Ruíz; G. Díaz, Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México, 1ra Ed.; INIFAP, 2012, p. 140.
  49. SAGARPA, Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos

- y de Desarrollo Científico y Tecnológico, Ed.; SAGARPA, México, 2009, p. 25.
50. SAGARPA, Inauguran planta piloto para producción de bioetanol a base de sorgo dulce en Veracruz, Comunicado de prensa, 2015. Available from: <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2015B571.aspx>
  51. BIOMEX, Bioenergéticos Mexicanos SAPI de C.V., 2015. Available from: <http://www.bioenergeticos.mx/>
  52. ISO, Norma ISO 14040:2006, Environmental management, Life cycle assessment: principles and framework, 2006, p. 26.
  53. Centro Mario Molina, Aplicación del Modelo EBAMM para Estimar el Impacto Ambiental y Energético de la Producción de Bioetanol a partir de Caña de Azúcar en México desde la Perspectiva de Ciclo de Vida, 2008, p. 7. Available from: <http://centromariomolina.org/w>.
  54. A. Tukker, Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment, Environmental Impact Assessment Review. 20, 435-456, 2000.
  55. A. Singh; D. Pant; S. I. Olsen, Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources, Ed.; Springer, London, 2013, p. 1-11.
  56. F. Freireb; J. Malça, Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation, Energy. 31, 3362-3380, 2006.
  57. C. A. García; A. Fuentes; A. Hennecke; E. Riegelhaupt; F. Manzini; O. Masera, Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico, Applied Energy. 88, 2088-2097, 2011.
  58. M. Junginger; A.P.C. Faaij; J. V. Dam, From the global efforts on certification of bioenergy towards an integrated approach based on sustainable land use planning, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14, 2445-2472, 2010.
  59. ISO, Norma ISO 14044:2006, Environmental management, Life cycle assessment: requirements and guidelines, 2006, p. 56.
  60. P. Fullana; M. Betz; R. Hischier; R. Puig, Life cycle, Assessment applications: results from COST and 530, Ed.; AENOR, España, 2008, p. 284.
  61. A. Aranda; I. Zabalda; A. Martínez; A. Valero; S. Scarpellini, El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta de Gestión Empresarial, Ed.; Fundación CONFEMETAL, España, 2006, p. 161.

62. M. P. Duarte, Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E6) y la infraestructura para su manejo en México, Ed.; SENER, México/Alemania, 2010.
63. J. Sánchez; A. Cardona; L. Sánchez, Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: una aproximación cuantitativa, Revista Universidad EAFIT. 43, 59-79, 2007.
64. C. Pieragostini; P. Aguirre; M. C. Mussati, Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina, Science of the Total Environment. 472, 212-225, 2014.
65. M. M. Acreche; A. H. Valeiro, Greenhouse gasses emissions and energy balances of a non-vertically integrated sugar and ethanol supply chain: A case study in Argentina, Energy. 54, 146-154, 2013.
66. M. J. Amores; F. D. Mele; L. Jiménez; F. Castells, Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina, LCA for renewable resources, Springer. 18, 1344–1357, 2013.
67. O. A. Avila; J. A. Suárez; K. A. Ojeda; V. Kafarov, Análisis de ciclo de vida del proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña, INGENIATOR, Universidad de San Buenaventura. 2, 85-97, 2012.
68. D. A. Lopes; I. Delaj; M. M. de Miranda; M. L.D. Montes; A.R. Ometto, LCA Application: The Case of the Sugar Cane Bagasse Electricity Generation in Brazil. 19<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012, p. 85-90.
69. M. Contreras; E. Rosa; M. Pérez; H. V. Langenhove; J. Dewulf, Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production, Journal of Cleaner Production. 17, 772-779, 2009.
70. L. Luo; E. van der Voet; G. Huppes, Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13, 1613-1619, 2009.
71. A. Olukoya; D. Bellmer; J. R. Whiteley; C. P. Aichele, Evaluation of the environmental impacts of ethanol production from sweet sorghum, Energy for Sustainable Development. 24, 1-8, 2015.
72. M. Wang; X. Pan; X. Xia; B. Xi; L. Wang, Environmental sustainability of bioethanol



- produced from sweet sorghum stem on saline–alkali land, *Bioresource Technology*. 187, 113-119, 2015.
73. C. E. Vlachos; N.A. Mariolis; G.N. Skaracis, A comparison of sweet sorghum and maize as first-generation bioethanol feedstocks in Greece, *Journal of Agricultural Science*. 153, 853-861, 2015.
  74. H. Cai; J. B. Dunn; Z. Wang; J. Han; M. Q. Wang, Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States, *Biotechnology for Biofuels*. 141, 1-15, 2013.
  75. S. Muhammad; M. Kadambot, *Conservation Agriculture: Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems*, Ed.; Springer, 2015, Chapter 1, 3-17.
  76. E. Iswanto-Wiloso; R. Heijungs, Key Issues in Conducting Life Cycle Assessment of Bio-based Renewable Energy Sources. *Green Energy and Technology, Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, Ed.; Springer, 2013, Chapter 2, 13-36.
  77. Pré, Various authors, *SimaPro Database Manual, Methods library*. 2013, p. 82.
  78. Z. Budavari; Z. Szalay; N. Brown; T. Malmqvist; B. Peuportier; I. Zabalza; G. Krigsvoll; C. Wetzel; X. Cai; H. Steller; W. Tritthart, Indicators and weightings systems, including normalisation of environmental profiles, *LoRE-LCA-Deliverable 5.1 Final version*. 2011, p. 80.
  79. J.B. Guinée; M.Gorrée; R. Heijungs; G. Huppes; R. Kleijn; A. de Koning; L. van Oers; A. Wegener; S. Suh; H. A. U. de Haes, *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*, Ed.; Springer, 2002, p. 692.
  80. S. Franco, Estudio de la producción de azúcares en cuatro variedades de sorgo dulce para la producción de etanol, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., México, 2011, p. 75.
  81. M. Equihua; Obtención de etanol por sacarificación y fermentación simultánea a partir de biomasa lignocelulósica de tallos de sorgo dulce, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., México, 2013, p. 81.
  82. M. I. Montoya; Ó. J. Sánchez; C. A. Cardona; A. Quintero, Evaluación de la deshidratación de alcohol carburante mediante simulación de procesos, *Ciencias Agropecuarias*. 5, 72-83, 2007.
  83. P. A. Bastidas; I. D. Gil; G. Rodríguez, Comparision of the main ethanol

- dehydration technologies through process simulation, 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2010, p. 6.
84. Z. Miao; T.E. Grift; A.C. Hansena; K.C. Tinga, Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical, *Industrial Crops and Products*. 33, 504-513, 2011.
  85. M. J. Negro; M.L. Solano; P. Ciria; J. Carrasco, Composting of sweet sorghum bagasse with other wastes, *Bioresource Technology*. 67, 89-92, 1999.
  86. R. Yin; R. Liu; Y. Mei; W. Fei; X. Sun, Characterization of bio-oil and bio-char obtained from sweet sorghum bagasse fast pyrolysis with fractional condensers, *Fuel*. 112, 96-104, 2013.
  87. D. Wen S., *Thermal food processing: New technologies and quality issues*, 2nd Ed.; CRC Press. 2012, p. 35.
  88. PRé Consultants, *Licencia de SimaPro 8.0*, PRé Consultants by 2015, UADY 8.0.5.13. Programa de simulación SimaPro, 2015.
  89. RSB, *Greenhouse Gas Calculation- RSB GHG Calculator*, 2014. <http://rsb.org/ghgcalc/>
  90. Instituto nacional de estadística y geografía, INEGI, 2009. <http://www.inegi.org.mx/>
  91. T. Nemecek, J. Schnetzer, *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, 2012.
  92. RSB- *Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB GHG Calculation Methodology*, 2011. Available from: <http://www.rsb.org>.
  93. Bolzamsa, *Bolsa de Comercio de Mendoza*, 2004. Available from: <http://www.bolsamza.com.ar/mercados/mostos/mosto1.pdf>
  94. UNITOOL, *Industrias UNITOOL*, 2014. Available from: <http://www.industriasunitool.com/xtras/trapiche.pdf>
  95. U.S. Department of energy, *Energy efficiency & Renewable Energy efficiency, Lower and Higher Heating Values of Fuels*. 2015. Available from: <http://hydrogen.pnl.gov/tools/lower-and-higher-heating-values-fuels>
  96. Y.Zhang; S. Luan; L. Chen; M. Shao, Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China, *Journal of Environmental Management*. 92, 480-493, 2011.

97. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes & Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH<sub>3</sub>, NO y N<sub>2</sub>O provenientes de las tierras agrícolas, Roma, 2004, p.120.
98. J. Prieto; C. A. González; A. D. Román; F. Prieto, Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10, 29-44, 2009.
99. E. Menichettia; M. Otto, Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use. Energy Balance & Greenhouse Gas Emissions of Biofuels from a Life Cycle Perspective, Ed.; SCOPE, 2009, Chapter 4, 81-109.
100. Instituto nacional de ecología y cambio climático, Metales Pesados, México, 2009. Available from: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>
101. B. A. Steen, Abiotic Resource Depletion, Different perceptions of the problem with mineral deposits, Ed; Springer. 2006, Vol. 1, 49-54.

## ANEXOS

Las figuras A1a y A1b muestran los parámetros de energía de calentamiento y energía de condensación que sirvieron para determinar el número de platos en el destilador, se muestra que a partir de 30 platos la energía de calentamiento y condensación no tienen cambios significativos.

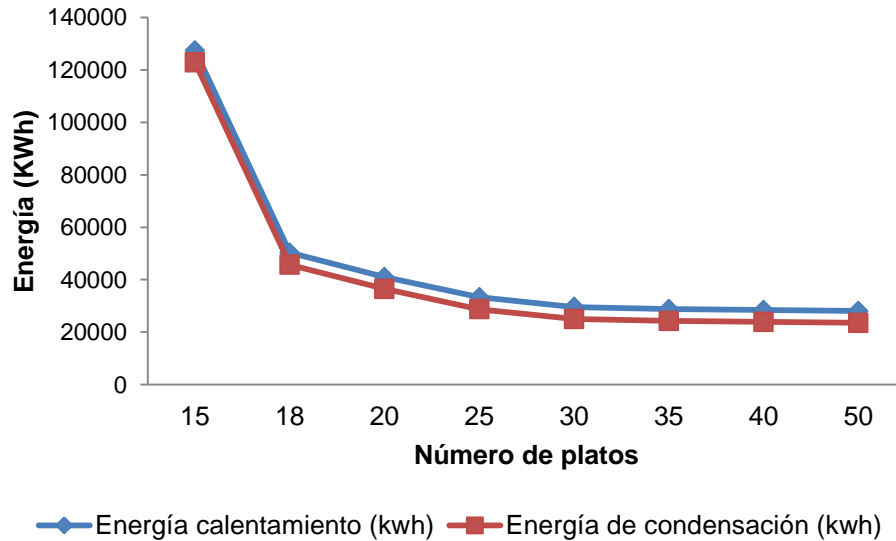


Fig. A1a. Variación de energía de calentamiento y energía de condensación según el número de platos en Aspen Plus para el escenario E1.

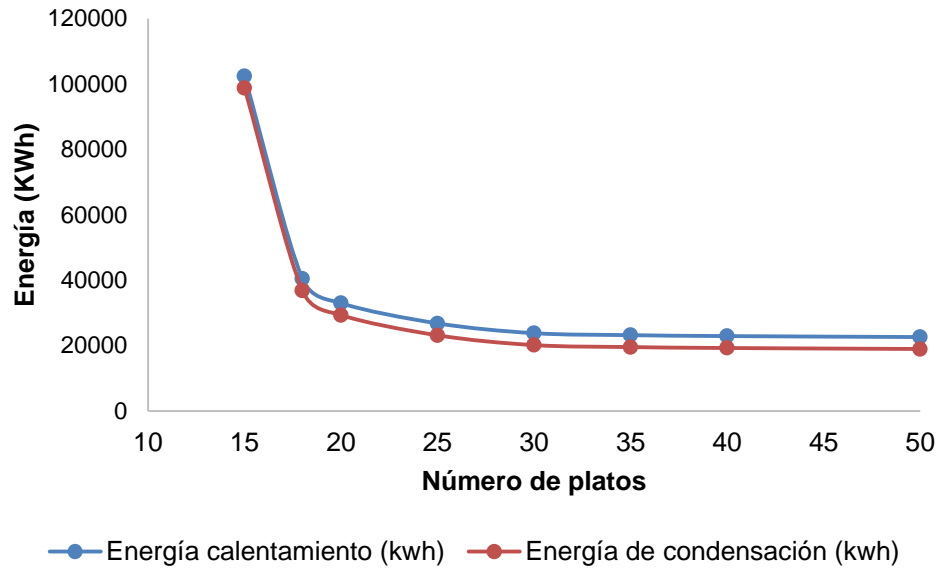


Fig. A1b. Variación de energía de calentamiento y energía de condensación según el número de platos en Aspen Plus para el escenario EII y EIII.

En la tabla A2 se presentan las cantidades de energía no renovable utilizada en cada sistema de ciclo de vida de los escenarios propuestos, estos fueron simulados por SimaPro v8.0, utilizando la metodología DAE.

En la tabla A3 se presentan las cantidades de emisiones generadas por categoría de impacto, particularmente para el proceso del pretratamiento químico. En esta se identifican los puntos críticos, que causan estos porcentajes por arriba del 90%.

Tabla A2. Energía no renovable utilizada por categoría de impacto en los escenarios.

Proceso	Energía no renovable- EI		Energía no renovable- EII		Energía no renovable- EIII	
	(MJ)	%	(MJ)	%	(MJ)	%
Producción de sorgo dulce (etapa agrícola)	27,661.97	29.4	27,661.97	55.46	27,661.97	2.97
Transporte de tallos	1,968.65	2.1	1,968.65	3.95	1,968.65	0.21
Extracción de jugo y bagazo	5,916.57	6.3	0	0	5,916.57	0.63
Fermentación	138.33	0.15	138.33	0.28	138.33	0.01
Secado	-		6.45	0	58,153.86	6.24
Molienda	-		0	0	150,817.94	16.18
Combustión del bagazo			115.45	0.23	-	-
Pretratamiento químico de bagazo	-		-	-	550,944.25	59.12
Sacarificación y fermentación simultánea	-		-	-	44,963.16	4.82
Destilación	47,020.4	49.97	19,997.34	40.09	86,071.9	9.24
Deshidratación	3,315.96	3.52	0	0	5,350.07	0.57%
Tratamiento del bagazo	8,075.39	8.6	-	-	-	-
Total	94,097.3	100	49,881.76	100	902,913.25	100

Tabla A3. Impactos potenciales en el proceso de pretratamiento químico.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Pretratamiento químico de bagazo	Peróxido de hidrógeno	Hidróxido de sodio	Ácido sulfúrico	Calor- gas natural	Tratamiento de residuos- Bagazo de sorgo	Tratamiento de aguas
P. R. Recursos abióticos	%	100	0	62.30	23.24	2.63	10.81	0.81	0.20
P. Acidificación	%	100	0	43.80	25.67	25.16	2.56	2.42	0.40
P. Eutrofización	%	100	0	49.86	28.56	10.63	1.70	3.75	5.51
P. Calentamiento global	%	100	0	59.20	26.18	2.91	10.32	1.03	0.35
P. R. Capa de ozono	%	100	0	15.33	79.88	0.67	3.82	0.20	0.10
P. Toxicidad humana	%	100	0	85.15	8.10	4.35	0.96	1.24	0.19
P. Ecotox de agua fresca	%	100	0	62.90	23.20	11.44	1.28	0.59	0.59
P. Ecotox de agua marina	%	100	0	54.37	27.82	14.99	1.96	0.50	0.37
P. Ecotox terrestre	%	100	0	57.72	33.20	3.79	1.27	2.85	1.16
P. Oxid fotoquímica	%	100	0	47.26	23.82	22.55	4.77	1.24	0.37

En las tablas A4a, A4b, A4c y A4d se reportan los impactos potenciales que contribuyeron en la etapa de cultivo, transporte y la conversión a biocombustible en la planta industrial. Estos datos se obtuvieron de la simulación de SimaPro v8.0, utilizando la metodología CML-2001 y sirvieron para calcular las emisiones de GEI por MJ de etanol.

Tabla A4a. Impactos potenciales para la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce, escenario EI.

<b>Categoría de impacto ambiental</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Transporte</b>	<b>Conversión bioetanol</b>
P. R. Recursos abióticos	kg Sb <sub>e</sub>	15.03	0.87	31.38
P. Acidificación	kg SO <sub>2e</sub>	22.73	0.74	23.12
P. Eutrofización	kg PO <sub>4e</sub>	12.62	0.13	6.48
P. Calentamiento global	kg CO <sub>2e</sub>	2,241.97	145.50	19,740.87
P. R. Capa de ozono	kg CFC_11 <sub>e</sub>	9.11E-05	4.8E-08	3.3 E-04
P. Toxicidad humana	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1,836.22	114.30	2,704.64
P. Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	714.47	40.70	435.51
P. Ecotoxicidad de agua marina	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	14 E06	1.4 E05	9.7 E05
P. Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	19.36	0.01	15.96
P. Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4e</sub>	0.77	0.03	0.83

Tabla A4b. Impactos potenciales para la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce, escenario EII.

<b>Categoría de impacto ambiental</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Transporte</b>	<b>Conversión bioetanol</b>
P. R. Recursos abióticos	kg Sb <sub>e</sub>	15.03	0.87	9.51
P. Acidificación	kg SO <sub>2e</sub>	22.73	0.74	9.29
P. Eutrofización	kg PO <sub>4e</sub>	12.62	0.13	22.79
P. Calentamiento global	kg CO <sub>2e</sub>	2,241.97	145.50	24,543.07
P. R. Capa de ozono	kg CFC_11 <sub>e</sub>	9.11E-04	4.8E-08	1.8 E-04
P. Toxicidad humana	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1,836.22	114.30	3,196.66
P. Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	714.47	40.70	1,233.1
P. Ecotoxicidad de agua marina	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1.4 E06	1.4 E05	2.1 E06
P. Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	19.36	0.01	62.4
P. Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4e</sub>	0.77	0.03	1.2



Tabla A4c. Impactos potenciales para la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce, escenario EIII.

<b>Categoría de impacto ambiental</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Transporte</b>	<b>Conversión bioetanol</b>
P. R. Recursos abióticos	kg Sb <sub>e</sub>	15.03	0.87	9.51
P. Acidificación	kg SO <sub>2e</sub>	22.73	0.74	9.82
P. Eutrofización	kg PO <sub>4e</sub>	12.62	0.13	10.18
P. Calentamiento global	kg CO <sub>2e</sub>	2,241.97	145.50	22,170.9
P. R. Capa de ozono	kg CFC_11 <sub>e</sub>	9.11E-04	4.8E-08	8.9 E-05
P. Toxicidad humana	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1,836.22	114.30	1,247.44
P. Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	714.47	40.70	477.93
P. Ecotoxicidad de agua marina	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1.4 E06	1.4 E05	5.2 E05
P. Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	19.36	0.01	43.04
P. Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4e</sub>	0.77	0.03	0.58

Tabla A4d. Impactos potenciales para la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce, escenario EIV.

<b>Categoría de impacto ambiental</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Transporte</b>	<b>Conversión bioetanol</b>
P. R. Recursos abióticos	kg Sb <sub>e</sub>	15.03	0.87	472.64
P. Acidificación	kg SO <sub>2e</sub>	22.73	0.74	390.96
P. Eutrofización	kg PO <sub>4e</sub>	12.62	0.13	83.8
P. Calentamiento global	kg CO <sub>2e</sub>	2,241.97	145.50	6.3 E04
P. R. Capa de ozono	kg CFC_11 <sub>e</sub>	9.11E-04	4.8E-08	1.2 E02
P. Toxicidad humana	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1,836.22	114.30	9.2 E04
P. Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	714.47	40.70	1.7 E04
P. Ecotoxicidad de agua marina	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	1.4 E06	1.4 E05	3.4 E07
P. Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB <sub>e</sub>	19.36	0.01	280.89
P. Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4e</sub>	0.77	0.03	17.09