



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LA CADENA DE
PRODUCCIÓN DE ALCOHOLES, A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE
TRIGO Y MAÍZ.

TESIS, QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CAROLINA ARELLANO HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. IDANIA VALDEZ VAZQUEZ, II UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. ANNE HANSEN HANSEN, IMTA
DR. ARMANDO GONZÁLEZ SÁNCHEZ, II UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO. ENERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dra. Anne Hansen Hansen
Secretario:	Dr. Armando González Sánchez
Vocal:	Dr. Julio Sacramento Rivero
1 er. Suplente:	Dra. Patricia L. Güereca Hernández
2 do. Suplente:	Dra. Idania Valdez Vazquez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA),
Unidad Académica Juriquilla-Querétaro. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional
Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS



Dra. Idania Valdez Vazquez

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización los estudios de maestría.

Al Fondo de Sustentabilidad Energética 2014-05 de la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Clúster de Biocombustibles Lignocelulósicos para el Sector Transporte (no. 249564) del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE BIO) por financiar este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto de Ingeniería (II) y al Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA) por la facilidad de ocupar sus instalaciones para la realización del trabajo de investigación.

A los doctores Anne Hansen y Armando González por formar parte de mi comité tutor y apoyar en el enriquecimiento de este trabajo de investigación con sus observaciones y comentarios.

Al Maestro Jaime Pérez por su asistencia técnica en el laboratorio, así como todos sus comentarios de apoyo durante los momentos de incertidumbre.

A la doctora Idania Valdez Vazquez por su apoyo incondicional y paciencia, por creer en mi y hacer que la confianza en mi misma creciera, por todas las enseñanzas tanto académicas como de vida, por enseñarme a admirar a alguien que ama su trabajo y motivarme a hacer lo mismo. Gracias por ser mas que una asesora, por siempre dar el cien por ciento, de corazón muchas gracias.

A el Dr. Christian Hernandez, por su apoyo incondicional y paciencia, por motivarme a enamorarme aun más de la ciencia y ver lo maravilloso que puede ser descubrir y aportar algo nuevo, por motivarme a no rendirme y darme palabras de aliento, gracias por cada enseñanza académica y de vida, por convertirte en un muy querido amigo.

A mis amigos de LIPATA, Luis, Julian, Jonathan, Rocher, Monica, Yara, Lorena, Diana, Alejandra, Lupita y Majo, por hacer lo pesado de la maestria llevadero, por brindarme su amistad, amor y consejo, por todos los buenos momentos que pasamos y su apoyo en los malos, por estar ahí con sus risas y ocurrencias, por hacer de esta etapa una de las mejores de mi vida, por ser mi familia queretana. Los quiero.

A mis hermanos postizos que amare toda la vida, Caro del Norte y Felipe, por siempre estar ahí para mi dandome apoyo y motivación, por darme tantos momentos de risa y alegría haciendo la maestria algo más sencillo, por los buenos y malos consejos que me ayudaro a ser la persona que soy ahora, por beber, reir y llorar conmigo, por las tardes de trabajo y los ratos de ocio, por los regaños y las felicitaciones, por ser mis roomies y hermanos, Los amo.

A mis admirables padres, que siempre me sieron su paoyo incindicional para que yo lograra esta meta de mi vida, por sus palabras de aliento y sus regaños cuando era necesario, por amamerme tan inmensamente y preocuparse por mi, por motivarme a ser mejor y siempre seguir su buen ejemplo, los amo de todo corazón e infinitas gracias por todo.

A mi maravillosa hermana pequeña, por ser mi motor y motivación a ser mejor cada día, por darme tu alegría y consejos, por tu apoyo y amor incondicional, por aguantar mis quejas y darme mis regaños cuando era necesario. Te amo con todo mi corazón.

A toda mi familia, por sus palabras de aliento y apoyo en todo momento, por motivarme a ser mejor cada día, por enseñarme las alegrías de la vida y el amor incondicional. Los quiero.

A Dios, por permitirme estar en donde estoy, darme todas las personas maravillosas que tengo en la vida y darme tantas buenas y malas experiencias que día a día me hacen mejorar.

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional y apoyo en los momentos más oscuros, por siempre respetar mis decisiones y apoyarme para ser mejor. Por ser mi fuerza y mi motor cuando mas los necesitaba. Los amo.

A mi querida Mayi, por su confianza y admiración, por motivarme a ser mejor persona y dar lo mejor de mi siempre, por ser mi apoyo a pesar de ser pequeña y darme alegría con tus ocurrencias, te amo hermana.

A toda mi familia, por tener tanta confianza en mi y echarme porras, por sus palabras de aliento y cariño, los quiero a todos.

RESUMEN

Una de las alternativas para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero del sector autotransporte es el uso de biocombustibles como el butanol. Es importante por tanto medir huella de carbono y la huella hídrica del proceso de producción de butanol para garantizar que tiene menores impactos que la gasolina. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue identificar los impactos ambientales de la cadena de producción de biobutanol carburante a partir de biomasa lignocelulósica residual de trigo y maíz. Primero, se realizó la delimitación del sistema que incluye tres fases de la producción de butanol carburante: fase agrícola, transporte de biomasa del campo de la planta industrial, y la fase industrial. La unidad funcional fue 1 MJ de butanol. Los escenarios evaluados fueron: escenario de producción de butanol donde el 70% de los residuos de cosecha (rastrajo de maíz y paja de trigo) se utilizan como materia prima para la producción de butanol; y el escenario convencional donde los residuos de cosecha se dejan en campo o se queman según las prácticas agronómicas actuales.

La determinación de la huella de carbono indicó que, de las tres fases de la cadena de producción de butanol, la fase industrial contribuyó hasta con el 90% del total de las emisiones de CO₂, donde la generación de electricidad tuvo la mayor producción de emisiones. Por tipo de biomasa utilizada como materia prima, el rastrojo de maíz presentó 22% más emisiones de CO₂ por MJ de butanol, que la paja de trigo ya que presentó menores rendimientos de producción de butanol. Se observó que, a mayores rendimientos de butanol, la huella de carbono fue menor. En cuanto a la huella hídrica, la paja de trigo presentó una huella hídrica 65% mayor que el rastrojo de maíz. La fase agrícola fue la responsable del mayor consumo de agua, el cual fue 4.3 veces mayor que en la fase industrial. El biobutanol obtenido por plataforma bioquímica presenta un mayor impacto ambiental medido como huella de carbono y huella hídrica en comparación con la gasolina. Por tanto, se tienen que establecer estrategias para lograr tener menores impactos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
2.	Hipótesis.....	3
3.	Objetivos	4
3.1.1.1.	Objetivo general	4
3.2.	Objetivos específicos.....	4
4.	Marco teórico	5
4.1.	Combustibles fósiles y sus impactos ambientales.....	5
4.2.	Bioenergía.....	6
4.3.	Biocombustibles líquidos	7
4.4.	Bioalcoholes de primera y segunda generación.....	8
4.4.1.1.	Bioetanol.....	9
4.4.1.2.	Biobutanol.....	10
4.5.	Impactos ambientales de los bioalcoholes.....	11
4.6.	Producción de materia prima	12
4.6.1.1.	Trigo	12
4.6.1.2.	Maíz.....	12
4.7.	Huella de carbono (hc)	13
4.8.	Huella hídrica (hh)	14
5.	Antecedentes	16
6.	Metodología.....	19
6.1.	Delimitación del sistema y unidad funcional.....	20
6.2.	Planteamiento de escenarios	21
6.3.	Determinación de impactos ambientales	22
6.3.1.1.	Fase agrícola	22
6.3.1.2.	Selección de los casos de estudio	23
6.3.1.3.	Rendimiento y composición de biomasa	24
6.3.1.4.	Levantamiento de inventarios	26
6.3.1.5.	Cálculo de la huella de carbono (hc).....	27
6.3.1.6.	Cálculo de huella hídrica (hh).....	32
6.3.1.7.	Asignación de impactos.....	35
6.3.2.	Transporte de biomasa residual	38
6.3.3.	Fase industrial	40
6.3.3.1.	Cálculo de la huella de carbono (hc).....	41
6.3.3.2.	Cálculo de la huella hídrica (hh).....	43
6.4.	Integración de resultados de la cadena de producción de biobutanol.....	46
6.4.1.	Cálculo de la huella de carbono global	46
6.4.2.	Cálculo de la huella hídrica global.....	48

7.	Resultados y discusión	49
7.1.	Rendimiento y composición de biomasa residual.....	49
7.2.	Levantamiento de inventarios.....	53
7.3.	Fase agrícola	57
7.3.1.	Huella de carbono (hc)	57
7.3.2.	Huella hídrica (hh)	61
7.4.	Transporte de biomasa residual	64
7.5.	Fase industrial	66
7.5.1.	Cálculo de la huella de carbono (hc).....	67
7.5.2.	Cálculo de la huella hídrica	68
7.6.	Integración de resultados de la cadena de producción de butanol	70
7.6.1.	Huella de carbono global.....	70
7.6.2.	Huella hídrica global	74
8.	Conclusiones	78
9.	Referencias	80
10.	Anexos.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de producción de bioetanol de primera y segunda generación (Abengoa Bioenergy, 2006)	10
figura 2. Metodología propuesta para determinar los impactos ambientales en la cadena de producción de biobutanol 2G.....	19
Figura 3. Límites del sistema en la cadena de producción de biobutanol carburante 2G....	20
Figura 4. Escenarios de estudio: convencional y de producción de biobutanol carburante.	21
Figura 5. Estrategia experimental para determinar los impactos ambientales en fase agrícola.	22
Figura 6. Ejemplo de proceso de asignación de impactos segun la fracción másica y económica.....	36
Figura 7. Biorrefinería bioquímica basada en cultivos mixtos para la producción de biobutanol carburante (Valdez-Vazquez & Sanchez, 2017).....	41
Figura 8. Variedades de trigo sembradas en Mexicali y Cajeme.....	51
Figura 9. Emisiones GEI por etapa de la fase agrícola.....	58
Figura 10. Huella de carbono de la fase agrícola.....	60
Figura 11. Evapotranspiración real del cultivo y consumo de agua en la fase agrícola.	62
Figura 12. Huella Hídrica en la fase agrícola.....	63
Figura 13. Huella de carbono por tonelada de biomasa transportada.....	65
Figura 14. Rendimiento de biobutanol en biorrefinerías alimentadas con paja de trigo y rastrojos de maíz.....	67
Figura 15. Huella de carbono por tonelada de biomasa procesada de biorrefinerías alimentadas con paja de trigo y rastrojos de maíz.....	68
Figura 16. Huella hídrica por tonelada de biomasa procesada en la fase industrial.....	69
Figura 17. Huella de carbono por tonelada de biomasa en la fase agrícola, transporte e industrial de la cadena de producción de biobutanol.....	71
Figura 18. Huella de carbono por MJ de butanol.....	72

Figura 19. Relación entre rendimiento de butanol y huella de carbono	72
Figura 20. Huella hídrica por tonelada de biomasa por fase de la cadena de producción de biobutanol.....	75
Figura 21. Huella hídrica por MJ de butanol de la cadena de producción de biobutanol.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del etanol y butanol.....	8
Tabla 2. Huellas de carbono y Huellas hídricas reportadas para la fase agrícola.	16
Tabla 3. Huellas de carbono y Huellas hídricas reportadas para la fase industrial*.	17
Tabla 4. Huella de carbono y huella hídrica reportadas para la cadena de producción de bioalcoholes.....	18
Tabla 5. Índices de residuos (IR) para la biomasa residual de trigo y maíz.	23
Tabla 6. Descripción de casos de estudio.	24
Tabla 7. Número de puntos de muestreo.	26
Tabla 8. Municipios, capacidad de suministro de biomasa y distancias a la biorrefinería...38	
Tabla 9. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor de hidrógeno R01.....	42
Tabla 10. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor ABE R02	43
Tabla 11. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor metanogénico R03	43
Tabla 12. Índice de residuo para olotes y rastrojo de maíz en los casos de estudio.....	50
Tabla 13. Índice de residuo para paja de trigo en los casos de estudio	51
Tabla 14. Composición de la biomasa residual de trigo y maíz (en %).....	52
Tabla 15. Características del cultivo, tipo de siembra y manejo de residuos	54
Tabla 16. Uso y aplicación de fertilizantes y pesticidas.....	55
Tabla 17. Tipo de riego y volúmenes de agua empleados en el cultivo.....	55
Tabla 18. Empleo de maquinaria y consumo de combustible	56
Tabla 19. Valores de asignación para trigo y maíz en los casos de estudio	59
Tabla 20. Comparación de metodologías y límites del sistema de trabajos previos.....	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 Potencial teórico de biomasa residual.....	23
Ec. 2 Índice de residuos.....	25
Ec. 3 Huella de carbono de la fase agrícola.....	27
Ec. 4 Total de emisiones de gases efecto invernadero del proceso de cultivo.....	27
Ec. 5 Emisiones directas de óxido nitroso (N_2O).....	28
Ec. 6 Emisiones de Óxido nitroso (N_2O) por aplicación de fertilizantes.....	28
Ec. 7 Emisiones de Óxido nitroso (N_2O) por residuos de cultivo dejados en campo.....	29
Ec. 8 Emisiones indirectas de Óxido nitroso (N_2O) del proceso de cultivo.....	29
Ec. 9 Emisiones por lixiviación de Óxido nitroso (N_2O).....	30
Ec. 10 Emisiones por volatilización de Óxido nitroso (N_2O).....	30
Ec. 11 Emisiones por uso de pesticidas.....	30
Ec. 12 Emisiones por uso de maquinaria.....	31
Ec. 13 Emisiones por quema de residuos del cultivo.....	31
Ec. 14 Huella hídrica de la fase agrícola.....	32
Ec. 15 Huella hídrica verde.....	32
Ec. 16 Consumo de agua total verde (CAVtotal).....	33
Ec. 17 Valor de evapotranspiración real del cultivo.....	33
Ec. 18 Condicionante entre precipitación efectiva y CAVtotal (1).....	34
Ec. 19 Condicionante entre precipitación efectiva y CAVtotal (2).....	34
Ec. 20 Huella hídrica azul.....	34
Ec. 21 Consumo de agua total azul (CAAtotal).....	34
Ec. 22 Huella hídrica gris.....	35
Ec. 23 Fracción de asignación de biomasa residual.....	36

Ec. 24 Fracción másica de biomasa residual	37
Ec. 25 Fracción valor de biomasa residual	37
Ec. 26 Huella de carbono por uso de maquinaria de transporte.....	39
Ec. 27 Número de veces que se realiza cierta operación.....	39
Ec. 28 Consumo de combustible por transporte.....	40
Ec. 29 Huella de carbono de la fase industrial.....	41
Ec. 30 Huella hídrica de la fase industrial	44
Ec. 31 Huella hídrica azul fase industrial	44
Ec. 32 Consumo de agua por operaciones unitarias de proceso	45
Ec. 33 Huella hídrica gris de la fase industrial	46
Ec. 34 Huella de carbono de la cadena de producción de biobutanol	47
Ec. 35 Suma de Huella de carbono de las 3 fases contabilizadas	47
Ec. 36 Rendimiento energético (1).....	47
Ec. 37 Huella hídrica de la cadena de producción de biobutanol	48
Ec. 38 Suma de Huella hídricas de las 3 fases contabilizadas	48
Ec. 39 Rendimiento energético (2).....	48

1. INTRODUCCIÓN

El 82% de la energía total en el mundo se produce a partir de fuentes de energía no renovables, y a pesar del bienestar que ésta ofrece, su producción emite gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen directamente al cambio climático. Los principales GEI son el bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC's) y vapor de agua. El CO_2 es el GEI dominante, por lo que se ha tomado como gas de referencia y las emisiones de otros GEI son ponderadas por el potencial de calentamiento global (PCG) en base a este. Los valores de PCG permiten comparar los impactos de las emisiones y las reducciones de éstas de los diferentes gases y sus valores son: $\text{CO}_2=1$, $\text{CH}_4=25$, el $\text{CO}=1.9$, $\text{N}_2\text{O}=298$. El N_2O es el gas con el mayor potencial de calentamiento global y sus emisiones se deben principalmente a la combustión de combustibles fósiles, especialmente en vehículos, los suelos agrícolas que utilizan fertilizantes sintéticos y abonos, el tratamiento de aguas residuales, la combustión de desechos y la quema y descomposición de biomasa (INECC, 2007; IPCC, 2006; SENER, 2015).

El sector energético mundial, es responsable de dos terceras partes de las emisiones totales de GEI, por lo que es necesario realizar una reconfiguración del sector energético mundial, y poder disminuir las emisiones para evitar temperaturas extremas, inundaciones, sequías, huracanes, entre otros como pérdidas económicas a causa del inminente cambio climático. (Álvarez, 2014; Díaz, 2013).

La bioenergía es parte de la estrategia nacional para diversificar la oferta energética y reducir las emisiones de GEI, ya que su materia prima es la biomasa, un material orgánico que producen las plantas a través de la fotosíntesis disminuyendo así el uso de energías no renovables (DOF 06-06-2012)

Los biocombustibles se obtienen a partir de la biomasa, distinguiéndose principalmente los biocombustibles sólidos como los pellets o briquetas, los biocombustibles gaseosos como el biogás y biometano, y por último los biocombustibles líquidos, que se dividen en primera generación (1G) y segunda generación (2G). Los biocombustibles 1G son aquellos que se obtienen a partir de cultivos alimenticios, como caña de azúcar, grano de maíz, entre otros. Los biocombustibles 2G por su parte son los obtenidos de residuos que no se emplean para la alimentación, como residuos agrícolas o forestales, aceites vegetales o grasas animales. Algunos ejemplos de estos últimos son el bioetanol y biodiesel (Maserá *et al.*, 2011).

Los biocombustibles líquidos 1G utilizan cultivos como la caña de azúcar y granos de cereales para obtener bioetanol vía fermentación, siendo Brasil y Estados Unidos los países con mayor producción de este biocombustible. Sin embargo, los biocombustibles 1G están identificados como uno de los principales factores que contribuyen en el aumento del precio de los alimentos en 2008 (Gnansounou *et al.*, 2009; Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). Como

respuesta, al alza en los precios de los alimentos derivados de la producción de biocombustibles 1G, se tomó como alternativa la producción de biocombustibles 2G). Estos biocombustibles utilizan como materia prima algún tipo biomasa lignocelulósica, dejando los granos de cereales para el consumo humano o animal. La biomasa lignocelulósica (BL) es toda materia orgánica que contiene lignina, celulosa y hemicelulosa, y entre las fuentes más abundantes están los residuos agrícolas, agroindustriales y forestales (Quintero, *et al.*, 2011).

México genera un volumen de BL suficiente para alimentar nuevas plantas de producción de biocombustibles líquidos 2G. Por ejemplo, los cultivos de cereales como maíz y trigo generan entre 2.5 a 5.0 ton BL/ha, energía equivalente a 0.5 t de carbón o 0.3 t de petróleo, pero con la reducción de emisiones de GEI (Manzini & Macías, 2004)

Los sistemas de producción de biocombustibles se integran por:

- La unidad de producción de biomasa
- La planta de conversión de biomasa en bioenergía.

Y con el fin de tener sistemas de producción de biocombustibles sostenibles, se deben realizar estudios para evaluar el impacto ambiental en toda la cadena de producción. Uno de los más utilizados, es la huella de carbono (HC) que representa la cantidad total de CO₂ eq y otros GEI emitidos durante todo el ciclo de vida de un sistema o producto, expresándose en unidades de masa de CO₂ equivalente por unidad funcional. La huella hídrica (HH) por otro lado, es un indicador del uso directo e indirecto de agua por en un proceso o producto, expresándose en volumen de agua por unidad funcional. La unidad funcional se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de entradas y salidas. Se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar, por ejemplo, para comprar la energía producto de los biocombustibles, se puede considerar como unidad funcional el MJ. La huella hídrica fue introducida por Hoekstra y Hung en el 2002 y desarrollada completamente por Hoekstra y Chapagain en los años 2007-2008. Estos ayudan a proponer e implementar acciones de mejora para el sistema (Čuček, Klemeš, & Kravanja, 2015).

El objetivo de este trabajo fue determinar los impactos ambientales medidos como HC y HH de la producción de biobutanol carburante a partir de BL de cultivos de trigo y maíz. Para ello, el trabajo estuvo dividido en cuatro fases: 1) delimitación del sistema y unidad funcional; 2) planteamiento de escenarios para la producción de biobutanol 2G a partir de biomasa residual de trigo y maíz; 3) determinación de los impactos ambientales medidos como huella de carbono y huella hídrica en la fase agrícola, transporte y fase industrial y 4) la integración de los resultados.

2. HIPÓTESIS

Los esquemas de biorrefinería aplicados a la producción de butanol de segunda generación que utilizan como materia prima rastrojo de maíz tendrán un menor impacto ambiental medido como huella de carbono y huella hídrica por su alto rendimiento de producción de biomasa que aquellas biorrefinerías alimentadas con paja de trigo cuyo rendimiento de producción de biomasa es menor.

3. OBJETIVOS

3.1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los impactos ambientales de la cadena de producción de biobutanol carburante a partir biomasa lignocelulósica residual de trigo y maíz.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar mediante datos de actividad agrícola, los municipios con una generación de biomasa residual de trigo y maíz que sea suficiente para alimentar una planta de producción de biobutanol 2G de al menos 500 t de residuos agrícolas/d.
- Calcular la huella de carbono en la cadena de producción de biobutanol carburante 2G a partir de residuos lignocelulósicos de cultivos de trigo y maíz.
- Calcular la huella hídrica en la cadena de producción de biobutanol carburante 2G a partir de residuos lignocelulósicos de cultivo de trigo y maíz.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. COMBUSTIBLES FÓSILES Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES

El aprovechamiento y utilización de la energía es de gran importancia para el desarrollo y bienestar de un país, sin embargo, el consumo adecuado y asequible de energía es indispensable para el desarrollo económico y social de un país. La situación actual exige cambiar la forma en que se produce y consume la energía para garantizar un desarrollo económico sustentable, al mismo tiempo que se satisfacen las necesidades energéticas por medio del uso racional de los recursos y las tecnologías (Secretaría de Energía (SENER); Agencia Internacional de Energía (AIE), 2011).

En la actualidad el 81.2% de la energía total generada en el planeta es producida por fuentes de energía convencionales, de las cuales el 31.2% son generados por el petróleo, el 28.8% por carbón y sus derivados y el 21.2% por el gas natural (SENER, 2015).

Está claro que los combustibles fósiles representan la opción económica más viable para satisfacer la demanda energética, sin embargo existe la preocupación urgente de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), en especial dióxido de carbono (CO₂), que se emite a la atmósfera, el cual contribuye a la acumulación de los gases antes mencionados, que es uno de los impulsores del cambio climático (González, 2009).

A nivel mundial, el sector energético aproximadamente contribuye con el 80% de las emisiones de GEI. Estas emisiones en su mayoría provienen de la combustión al liberarse CO₂ como resultado de la oxidación de carbono en los combustibles. Las emisiones por combustión del sector energético mundial, aportan aproximadamente el 60% de los GEI (SENER, 2011).

A nivel nacional las emisiones de GEI en 2010, sumaron 748 millones de toneladas, lo que indica un incremento de 33.4% respecto al año base 1990, y la categoría de energía en México contribuyó en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), con 67.3% de las emisiones de GEI (SEMARNAT, 2014).

El consumo total de energía para 2015 se incrementó un 3% respecto a 2014, y fueron las gasolinas con el 29% el tipo de energía con mayor consumo. Estas mostraron un incremento en su demanda de un 3% respecto al año anterior, asociada principalmente al sector transporte. Este sector es el más intensivo en uso de energía representando el 46.4% del total (SENER, 2015).

En 2015 sector transporte contribuyó con la mayor parte de las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles, ya que generó 38.5% del total, registrando una tasa de crecimiento media anual de 3.4%. El consumo de combustibles para generación de electricidad aportó 28.2% de las emisiones totales y las emisiones del sector industrial por consumo de combustibles

fue equivalente al 14.8% del total, siendo de las más pequeñas el sector agropecuario con un 2% de las emisiones globales (SENER, 2011).

Debido a que los GEI son uno de los factores más importantes en el control de la temperatura de la atmósfera es fácil entender porque un incremento en su concentración puede alterar el flujo natural de la energía. La bibliografía menciona que a mayor concentración de GEI, mayor será la cantidad de calor absorbida y la superficie del planeta alcanzará temperaturas más altas. Es decir, se reduce la eficiencia con la cual la tierra remite la energía recibida al espacio y cualquier proceso que altere tal balance, se refleja tarde o temprano, como cambios en el clima.

El calentamiento global, es una de las manifestaciones más evidentes del cambio climático y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas; siendo de gran importancia mencionar que a pesar de que el clima cambia naturalmente, expertos señalan que existen evidencias claras que el calentamiento del planeta en los últimos 50 años puede ser atribuido a los efectos de las actividades humanas (Herrera, 2015)

Algunas de las afectaciones que presenta el planeta a causa del cambio climático son el calentamiento y aumento en el nivel de los océanos, eventos climáticos extremos como ondas de calor, sequías, inundaciones e incendios forestales, fenómenos meteorológicos como huracanes y ciclones tropicales, además que la funcionalidad natural de los ecosistemas se transforma, es decir, los animales y especies vegetales se desplazan y modifican su comportamiento pudiendo ocasionar la extinción de 16,000 especies y aumentar la deforestación y degradación del suelo (Álvarez, 2014).

El sector energético está estrechamente ligado con los desafíos globales a los que el mundo se enfrenta en la actualidad, tales como la degradación del medio ambiente, por lo que constituye una cuestión clave la existencia de un equilibrio adecuado entre las crecientes demandas de combustibles y la necesidad de proteger al ambiente a través del aumento de la competitividad energética.

4.2. BIOENERGIA

En la actualidad se postula que por razones ambientales, económicas y sociales es necesaria una transacción energética, la que se entiende como cambios en modelos de producción y utilización de energía hacia sistemas menos contaminantes y más equitativos. Las fuentes de energía renovables han sido algunas de las alternativas propuestas más prometedoras para superar los problemas energéticos basados en combustibles fósiles, tales como los impactos ambientales. Entre las energías renovables propuestas está la solar, eólica, hidráulica y la bioenergía (Matera *et al.*, 2011).

La bioenergía es la energía que proviene de la biomasa, y esta se define como los materiales no fósiles de origen biológico, tales como los residuos agrícolas. La biomasa se produce por las plantas al fijar luz y dióxido de carbono en el proceso de fotosíntesis. La energía solar queda atrapada en los enlaces químicos y puede ser liberada por procesos de combustión, la descomposición o a través de su hidrólisis y fermentación a biocombustibles (Sampeiro & Mart, 2010).

- Los biocombustibles se pueden obtener con un grado de procesamiento mayor o menor de acuerdo a las necesidades, pudiendo dividirse en (García, 2011)
 - Biocombustibles sólidos, que pueden quemarse directamente para producir calor y electricidad, algunos ejemplos son, la leña, carbón vegetal, pellets, entre otros.
 - Biocombustibles gaseosos, son los obtenidos de residuos municipales, aguas residuales, estiércol y pueden generar calor y electricidad, localmente y en sistemas interconectados.
 - Biocombustibles líquidos, son los que se obtienen de cultivos energéticos o residuos de cultivos, algunos ejemplos son el bioetanol y biodiesel.

4.3. BIOCMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La producción de biocombustibles líquidos se destina principalmente para la sustitución en forma parcial de la gasolina y el diésel del sector transporte. Los biocombustibles líquidos provienen de la biomasa y pueden ser diferenciados de acuerdo a sus características, tales como materia prima utilizada, proceso de transformación de la materia prima al biocombustible líquido y el uso dado. Unas de las formas más comunes para diferenciarlos es a través de la separación en primera, segunda y tercera generación como se muestra a continuación de acuerdo a su materia prima (RAENG, 2017).

- Primera generación, son aquellos biocombustibles que basan su producción en productos de cultivos alimenticios, siendo algunos ejemplos de materias primas de estos los granos de maíz, trigo y caña de azúcar.
- Segunda generación, son los derivados de biomasa lignocelulósica, que se encuentra presente en residuos de cultivos, residuos forestales, entre otros. Un dato importante es que estos residuos empleados no son utilizados para consumo humano.
- Tercera generación, son derivas de especies no alimenticias, a través de técnicas de biología molecular. Dentro de esto destacan actualmente el biodiesel producido a través de microalgas.

Los biocombustibles de primera generación se producen a través de tecnologías y procesos bien entendidos, como la fermentación y la destilación. Sin embargo, los combustibles de segunda generación todavía están en fase de investigación y desarrollo.

En la actualidad, los biocombustibles más ampliamente utilizados son el biodiesel y el bioetanol, siendo el último también denominado bioalcohol, y de acuerdo con (Manuel & Camús, 2015.). México tiene un potencial de producción de bioetanol de 338 PJ con caña de azúcar y de 84 PJ de bioetanol a partir de sorgo dulce. Su implementación como sustitutos de combustibles derivados de petróleo ha promovido la disminución de emisiones GEI ocasionadas por el sector transporte (Serrano-ruiz & Luque, 2011).

4.4. BIOALCOHOLES DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN

Los bioalcoholes son los biocombustibles líquidos generados a partir de procesos de fermentación de los diversos tipos de material vegetal. Dentro de los bioalcoholes se encuentra el bioetanol y el biobutanol. Algunas de sus ventajas y desventajas son las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del etanol y butanol

Etanol	Butanol
Se pueden realizar mezclas máximas de etanol y gasolina del 15% sin realizar cambios al motor, a mayores concentraciones si es requerido el cambio.	No presenta restricciones en las mezclas de butanol y gasolina y no requiere modificaciones el motor.
Octanaje mayor al de la gasolina	Octanaje igual al de la gasolina
Menor oxigenación del biocombustible, lo que se puede traducir en menor potencia.	Mayor oxigenación del biocombustible, lo que se puede traducir en mayor potencia.
Mayor presión de vapor, lo que lo hace menos seguro de manejar.	Menosr presión de vapor, lo que lo hace mas seguro de manejar.
Mayor calor latente específico de vaporización, lo que puede provocar problemas de arranque en climas frios.	Menor calor latente específico de vaporización, lo que puede evitar problemas de arranque en cilmas frios.

(Väisänen *et al.*, 2016; Szulczyk, 2010).

4.4.1. BIOETANOL

En 2005, el bioetanol representaba alrededor del 2% del mercado mundial de gasolinas. Sin embargo, estos mercados se encuentran en rápido desarrollo. El bioetanol se puede obtener a través de azúcares fermentables, derivados del almidón, celulosa y polisacáridos. El bioetanol se utiliza en mezclas de máximo 15% de etanol por volumen sin ninguna modificación al motor y de hasta 85% en volumen con gasolina en vehículos de combustible flexible (Serrano-ruiz & Luque, 2011). El bioetanol de primera generación se obtiene por fermentación de azúcares o almidones y el bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica que se basa en la conversión de la hemicelulosa y celulosa en azúcares fermentables (Mäser *et al.*, 2011).

El bioetanol es producido a través de la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de la biomasa. En el proceso produce alcohol hidratado, con un contenido de agua de aproximadamente 5% , y una vez deshidratado se usa como combustible (Sampeiro & Mart, 2010). Generalmente como materia prima para la obtención del alcohol se utilizan 3 familias de productos(García-Camús & García-Laborda, n.d.)

- Los azúcares, que provienen de la caña o remolacha.
- Cereales, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa.

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos (celulosa, hemicelulosa y lignina). Para obtener los azúcares de la biomasa, esta es tratada con ácidos o enzimas que faciliten su asimilación. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener la sacarosa, que es fermentada. Los principales métodos para extraer los azúcares son la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la enzimática (García-Camús & García-Laborda, n.d.). En la figura 1 se muestra el proceso de producción de bioetanol de primera y segunda generación.

El proceso de producción de bioetanol de primera y segunda generación es muy parecido en procesos, sin embargo para el bioetanol 1G, los azúcares se encuentran más fácilmente disponibles para ser asimilados y transformarlos, el proceso consta en que una vez obtenida la materia prima, esta se prepara por medio de la molienda y pasando después al proceso de obtención de azúcares, en donde se lleva a cabo la licuefacción, cocción y sacarificación para pasar al proceso de fermentación y finalmente a la destilación.

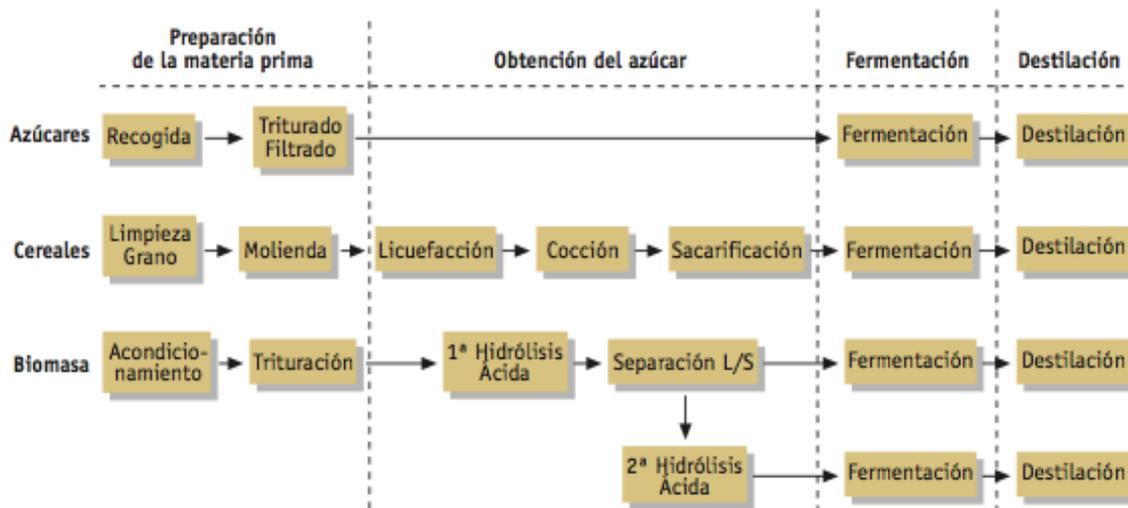


Figura 1. Proceso de producción de bioetanol de primera y segunda generación (ABENGOA BIOENERGY, 2006)

Los bioalcoholes 2G, son ligeramente más complicados de producir, ya que una vez obteniendo la biomasa, también pasa a trituración, pero para el proceso de la obtención de azúcares debe entrar primero a una hidrólisis ácida en donde es liberada la celulosa y hemicelulosa, después se lleva a cabo la separación de sólidos y líquidos y se procede a realizar una segunda hidrólisis, para obtener el azúcar que pasa al proceso de fermentación y finalmente a la destilación.

4.4.2. BIOBUTANOL

El uso de biocombustibles en los vehículos de gasolina y diésel está muy limitado por la tecnología de los motores. Las mezclas de butanol y gasolina no tienen restricciones, dado que el butanol es un hidrocarburo de cadena más larga más parecido a la gasolina variando de acuerdo a la flota vehicular. (Väisänen *et al.*, 2016).

El biobutanol se produce vía fermentación de azúcares que provienen de la biomasa en disolución acuosa. El primer paso es la conversión de los azúcares a butirato e hidrógeno, que posteriormente son transformados en butanol mediante microorganismos (Serrano-ruiz & Luque, 2011).

Para la producción de butanol, la fermentación acetona-butanol-etanol (ABE) es el proceso con mayores rendimientos de producción. La fermentación ABE emplea la bacteria *Clostridium* y produce una mezcla de productos compuestos por acetona, butanol y etanol.

El biobutanol puede emplear las mismas materias primas que el etanol, tales como maíz y caña de azúcar, al igual que biomasa lignocelulósica. Para la implementación de la biomasa lignocelulósica, el proceso requiere una hidrólisis previa a la fermentación para la transformación de la celulosa a glucosa. Este proceso aún sigue en desarrollo (Väisänen *et al.*, 2016; Rajchenberg-Ceceña, 2009)

4.5. IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS BIOALCOHOLES

Los bioalcoholes de primera generación tienen el potencial de disminuir las emisiones de GEI al momento de implementar en el sector autotransporte en comparación de la gasolina, lo que disminuye los efectos del cambio climático. Sin embargo, también es indispensable el identificar los impactos que presentan al ambiente y buscar áreas de oportunidad en los procesos de producción para hacer los procesos más sustentables.

Los bioalcoholes 1G se producen bajo diferentes condiciones y sistemas, en donde se varían los procesos empleados, el manejo de la tierra de cultivo de la materia prima a emplear, entre otras cosas. Los impactos de los bioalcoholes en el ambiente dependen del uso de suelo y la biomasa empleada en su mayoría de los casos, además del proceso de transformación de la materia prima (German *et al.*, 2010)

Uno de los principales impactos ocasionados por los biocombustibles líquidos 1G, es el cambio de uso de suelo y los monocultivos, ya que ocasionan pérdida de biodiversidad y degradan la capacidad de producción de la tierra al erosionarla. Como consecuencia de lo anterior, el uso de fertilizantes nitrogenados para cultivos empleados para la producción de alcoholes proyecta un aumento de 10 millones de toneladas, es decir aumentará la aplicación de fertilizantes un 25% más de los ya 85 millones de toneladas aplicadas a los cultivos. El uso intensivo de fertilizantes en el cultivo de la materia prima a usar de genera mayores emisiones de GEI e impactos a otros factores ambientales, como uso excesivo de agua y contaminación del recurso, por lo que una transición a los biocombustibles líquidos 2G podría significar la aplicación reducida de fertilizantes (Fischer *et al.*, 2007).

Los bioalcoholes de segunda generación por otro lado, tienen impactos ambientales variables que dependen considerablemente de la ruta de conversión de la materia prima al producto requerido y del residuo a utilizar como materia prima en donde se ve inmiscuido el manejo del cultivo que se le haya dado y las características del suelo y clima. Normalmente, para los bioalcoholes 2G las emisiones por cambio de uso de suelo no son contabilizadas, aunque deberían de serlo ya que causan impactos negativos al ambiente (Eisentraut, 2010).

4.6. PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA

Dentro de la cadena de producción de bioalcoholes, una de las fases con mayor impacto es la agrícola (obtención de materia prima). Entre los efectos secundarios de la producción de los cultivos se encuentran los impactos sobre el suelo, el agua y la biodiversidad, además de las emisiones de GEI producto de los fertilizantes, siendo muy preocupantes para los bioalcoholes, ya que el alcance de los impactos depende de cómo se producen las materias primas para biocombustibles y procesos, la escala de producción y en particular, como influyen en el cambio de uso de suelo y las variedades de cultivo empleadas (FAO, 2008).

Las variedades de cultivo más utilizados para la producción de alcoholes son el maíz y la caña de azúcar con alrededor del 90% del total siendo Estados Unidos y Brasil los mayores productores. El resto proviene de China y Europa, la materia prima se obtiene de cultivos de remolacha azucarera, maíz y trigo. En México, las materias primas con potencial de biomasa utilizable para la producción de bioalcoholes es la biomasa lignocelulósica principalmente de los cultivos de trigo y maíz por las cantidades de producción anual. (García, 2011)

4.6.1. Trigo

En México se cultiva trigo en más de 20 estados de la República. Sin embargo, 67% de la producción se genera bajo condiciones de riego en la zona norte, principalmente en Sonora y Baja California. El trigo presenta rendimiento promedio de 5.3 t/ha (Bautista, Hernandez, & Perez, 2008; SIAP, 2017).

El trigo es una planta gramínea con espigas de cuyos granos se saca la harina. La forma del grano de trigo es ovalada con extremos redondeados, en uno de ellos sobresale el germen y en el otro hay un mechón de pelos finos. La altura de la planta varía entre 30 y 150 cm. El trigo se cultiva de manera satisfactoria en climas sub-tropicales, moderadamente templados y moderadamente fríos. Los trigos de invierno se siembran en otoño y exigen un periodo largo de clima fresco, aproximadamente 6 meses (Infoagro, 2017).

4.6.2. Maíz

Durante el año agrícola 2015 la producción de maíz grano en México presentó una tasa anual de 6.1% para totalizar 25 millones de toneladas (FIRA, 2015). Actualmente los estados líderes en volumen de producción son Sinaloa (15.8%), Jalisco (14.9%), Michoacán (8.3%) y Estado de México (8%), en conjunto durante 2014 concentraron el 47% del total nacional considerando la modalidad de temporal y riego (Venegas, 2016). La planta de maíz es de fácil desarrollo y de producción anual. El tallo es erecto y puede alcanzar los 4 metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. Las hojas son largas, de gran tamaño y se encuentran abrazadas al tallo. El rendimiento promedio del maíz es de 7.5 t/ha y presenta un ciclo de cultivo de aproximadamente 5 meses (Montesillo-Cedillo, 2016).

En general, la fase agrícola presenta un gran consumo de agua, ya que el 70% de las extracciones de agua superficial se deben a este sector, colocándose como uno de los principales consumidores. Además, las emisiones de carbono relacionadas con la producción agrícola representan aproximadamente el 35% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero. La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero y uso de agua derivadas de la producción y consumo de biocombustibles es un asunto de gran importancia que necesita ser evaluado en todas las etapas de producción desde el cultivo de la materia prima, pasando por el transporte y conversión, y finalizando por la distribución y uso final (Casolani, Pattara, & Liberatore, 2016). Unas de las herramientas mayormente utilizadas para calcular los impactos ambientales por emisiones de GEI y uso de agua es a través de la huella de carbono y huella hídrica.

4.7. HUELLA DE CARBONO (HC)

Como se describe anteriormente, todas las actividades realizadas en un sistema de producción son responsables en cierta medida de emisiones de GEI, y la actividad agraria no es ajena a este hecho a pesar de no tener elevados consumos energéticos (Altuna *et al.*, 2012).

La huella de carbono cuantifica la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que son liberadas a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de cualquier actividad y es una herramienta útil para estimar el impacto de cualquier sistema de producción en el cambio climático, específicamente en la emisión o fijación neta de gases de efecto invernadero (Andrade, Campo, & Segura, 2014). Normalmente es expresada en kg de CO₂ equivalente por unidades relativas al producto obtenido.

El análisis de huella de carbono está asociado con las emisiones de un proceso o producto que se toman en cuenta desde la producción de la materia prima hasta su disposición final, sin embargo, también existen casos en los que se pueden o no abarcar todas las etapas o actividades que se realizan para el desarrollo de un producto, y brinda como resultado un dato que puede ser utilizado como un indicador ambiental global de la actividad y como punto de referencia básico, para el inicio de acciones de reducción de consumo de energía.

El cálculo de la huella de carbono identifica las fuentes de emisiones de GEI, lo que permite definir objetivos y establecer medidas de reducción de consumos de energía y emisión de gases contaminantes más efectivas, como consecuencia de un mejor conocimiento de los puntos críticos (De la Cruz & Chao, 2011).

Para el cálculo de la huella de carbono existen diferentes guías y normas internacionales cuyo objetivo es brindar credibilidad y aseguramiento a los informes de emisión de GEI, siendo las más relevantes (De la Cruz & Chao, 2011):

- ISO 14067
- GHG Protocol
- MC3

El fin de disponer de la huella de carbono es contar con información para lograr la reducción de emisiones de GEI a la atmósfera y, por lo tanto, la reducción del consumo energético.

4.8. HUELLA HÍDRICA (HH)

El agua es un recurso fundamental para la humanidad ya que es necesaria para beber, producir alimentos, realizar labores de limpieza, entre otros, sin embargo en los últimos años se ha observado una escasez del líquido a nivel mundial, debido a la sobre explotación de los recursos hídricos causando impactos negativos de manera social y ambiental (X. Wang *et al.*, 2015).

La agricultura consume cerca del 85% del recurso hídrico a nivel mundial, por lo que reducir el consumo de agua en este importante sector es parte de las principales estrategias para aliviar la escasez del líquido, por lo que el concepto de huella de hídrica ha sido usado recientemente para el manejo de los recursos hídricos e identificación de sus impactos (Ababaei & Ramezani Etedali, 2016).

La huella hídrica es una herramienta que ha sido desarrollada para el cálculo de las necesidades de agua por un proceso de producción. Esta herramienta fue introducida por Hoekstra y Hung (2002) y desarrollada más a fondo por P. W. Gerbens-Leenes, Hoekstra, & Meer (2008). Estos autores definen la huella hídrica como el volumen total de agua limpia utilizada para producir bienes y servicios relacionados con el consumo, en un año y se expresa normalmente en volumen de agua por unidad de producción (Por ejemplo: m³/t) (P. W. Gerbens-Leenes *et al.*, 2008).

Este indicador puede ser utilizado para analizar el consumo de agua en relación a la disposición del recurso en una determinada área geográfica, lo que quiere decir que ayuda a determinar si se usa el recurso sosteniblemente. Existen 2 metodologías para el cálculo del consumo de agua:

- UNE EN ISO 14046 Huella de agua principios, requisitos y directrices
- Huella hídrica propuesta por Hoekstra

Cada metodología presenta distintas variables y requerimientos para su implementación de acuerdo al proceso o producto a evaluar. La huella hídrica está compuesta por distintas variables para su mejor rendimiento, tales como (Conyngam *et al.*, n.d.; Waterfootprint, 2002):

- **Uso directo e indirecto del agua**, se refiere al volumen de agua incorporada o contaminada en toda la cadena de producción de un producto.
- **Agua Azul**, que es el consumo de agua superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. El consumo o pérdida se refiere a que el agua se evapora, no regresa a la misma cuenca, es dispuesta al mar o se incorpora a un producto.
- **Agua Gris**, es el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes dados las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua.
- **Agua Verde**, se refiere al agua de lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que se incorpora en productos agrícolas.

Medir la huella hídrica es esencial para permitir una planificación del recurso que garantice una seguridad hídrica, alimentaria y de crecimiento económico.

5. ANTECEDENTES

Los impactos ambientales medidos como huella de carbono (HC) y huella hídrica (HH) de los sistemas de producción de biocombustibles líquidos 1G y 2G, presentan HC y HH muy variables de acuerdo a los límites del sistema tomados en cuenta para el análisis, las condiciones agrícolas y de operación, la materia prima empleada, entre otras cosas. Se han reportado algunos estudios para las distintas fases de la cadena de producción de alcoholes, dentro de los cuales se reportan las emisiones y consumo de agua por producción de materia prima (tabla 2), las emisiones y consumo de agua del proceso industrial del bioalcohol (tabla 3) y reportan la HC y HH de la cadena de producción completa (tabla 4). De los trabajos revisados se encontraron los siguientes valores para cada una de las fases

Tabla 2. Huellas de carbono y Huellas hídricas reportadas para la fase agrícola.

Materia prima	Variables	Valor	Autor
Huellas de Carbono			
Trigo	-Empleo de maquinaria (compararon maquinaria nueva con maquinaria vieja). - Variación en concentración de fertilizantes.	769 kg CO ₂ eq/t de grano	Lares-Orozco et al. 2015
Trigo	- Variación en concentración de fertilizantes. - Variación de las formas de riego.	607 kg CO ₂ eq/t de grano	Z. Wang et al. 2015
Maíz	-Manejo del cultivo. -Realiza asignación de impactos ambientales entre grano y rastrojo.	236 kg CO ₂ eq/t de biomasa residual	Väisänen et al. 2016
Huellas Hídricas			
Maíz	- Ubicación de los cultivos (estudio a nivel internacional). - Asignación de impactos ambientales entre grano y rastrojo	205 m ³ /t de biomasa residual	Mathioudakis et al. 2017
Trigo	- Comparación entre tipos de riego.	3,071 m ³ /t de grano	Ababaei & Ramezani Etedali, 2016
Maíz	- Ubicación de los cultivos (estudio a nivel internacional).	2,388 m ³ /t de grano	P. W. Gerbens-Leenes et al. 2008

Tabla 3. Huellas de carbono y Huellas hídricas reportadas para la fase industrial*.

Materia prima	Bioalcohol	Variables	Valor	Autor
Huellas de Carbono				
Maíz	Biobutanol	- Fermentación ABE. - No se consideran los residuos sólidos en el proceso. - Los límites del sistema abarcan desde la producción de la materia prima, hasta la distribución del combustible.	2,100 kg CO ₂ eq/t de grano	Väisänen et al. 2016
Maíz	Bioetanol	- Diseño de la biorrefinería. - La energía se obtiene de gas natural. - Los límites del sistema abarcan desde la producción de la materia prima, hasta la distribución del combustible.	930-2,280 kg CO ₂ eq/t de grano	Liska et al. 2009
Paja de trigo	Bioetanol	- Diseño de la biorrefinería - Son usadas enzimas	930 kg CO ₂ eq/t de biomasa residual	Slade, Bauen, & Shah, 2009
Huellas Hídricas				
Melazas	Bioetanol	-Materia prima -Consumos de agua de acuerdo a ubicación	3.06 m ³ /t de melaza	Papong et al. 2017
Paja de arroz	Bioetanol	- Materia prima -Diseño de la biorrefinería	14.57 m ³ /t de paja	Chiu et al. 2015

*En estos trabajos, no se excluyen la distribución, uso y gestión de residuos y únicamente se toman en cuenta los valores de la fase industrial de la cadena de producción.

La fase agrícola y la fase industrial, son parte de la cadena de producción de bioalcoholes, y de acuerdo a los trabajos revisados se puede identificar que para la HC la fase industrial es la fase con mayor impacto debido principalmente a la producción de energía requerida para la refinería, por otro lado con respecto a la HH la fase agrícola es la que presenta mayor importancia. Sin embargo, cabe mencionar que los valores se pueden ver modificados de acuerdo a los límites de sistema establecidos en cada fase y las condiciones agrícolas y de operación que se sigan en cada caso.

Las HC y las HH reportadas para el ciclo de vida de los bioalcoholes, varían principalmente a los límites del sistema, el tipo de proceso o biorrefinería que se emplea y las condiciones de operación de cada una de las fases tomadas en cuenta. A pesar de las diferencias, los trabajos revisados permiten evaluar cómo la situación en relación al impacto ambiental de la cadena de producción de bioalcoholes.

Tabla 4. Huella de carbono y huella hídrica reportadas para la cadena de producción de bioalcoholes

Materia prima	Bioalcohol	Variables	Valor	Autor
Huella de Carbono				
Rastrojo de maíz	Biobutanol	- Límites del sistema. -Tipo de proceso. -Distancias de transporte de materia prima.	79-122 g CO ₂ /MJ	Väisänen et al. 2016
Melazas de caña	Bioetanol	- Límites del sistema. -Contabilizaron emisiones por insumos.	26-39 g CO ₂ /MJ	Papong et al. 2017
Tapioca	Bioetanol	- Límites del sistema -La fuente de energía del proceso fue carbón. -Distancia de transporte de materia prima.	66 g CO ₂ /MJ	Liu, et al. 2013
Huella Hídrica				
Melazas de caña	Bioetanol	- Límites del sistema. -Tipo de proceso. -Consumo directo de agua, no contabiliza el agua gris.	78 L/MJ	Papong et al. 2017
Trigo	Bioetanol	- Límites del sistema. -Tipo de proceso. -Estudio global.	0.11L/MJ	W. Gerbens-Leenes et al. 2009

6. METODOLOGÍA

El presente trabajo es un estudio prospectivo para determinar los impactos ambientales de la producción de biobutanol a partir de biomasa lignocelulósica residual de trigo y maíz considerando la cadena de producción desde la fase agrícola hasta la fase industrial. El trabajo se dividió en cinco fases: (1) delimitación del sistema y unidad funcional; (2) planteamiento de escenarios de producción de biobutanol 2G a partir de biomasa lignocelulósica residual de trigo y maíz; (3) cálculo de la huella de carbono y huella hídrica en la fase agrícola, transporte y fase industrial; y (4) integración de resultados (ver Figura 2).

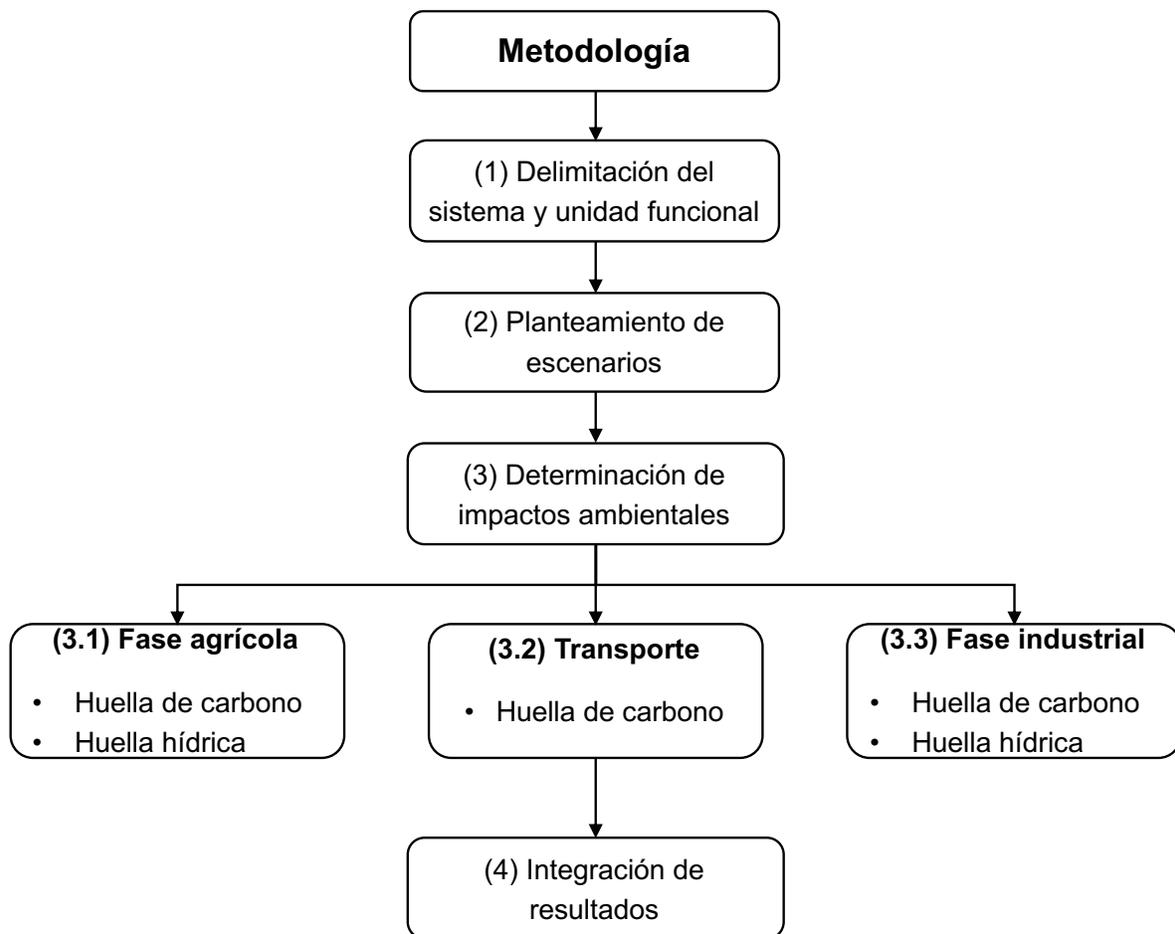


Figura 2. Metodología propuesta para determinar los impactos ambientales en la cadena de producción de biobutanol 2G.

6.1. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL

Para el presente trabajo se establecieron como límites del sistema de la cadena de producción de biobutanol carburante: (a) la **fase agrícola** que considera la generación de biomasa lignocelulósica residual; (b) el **transporte** de la biomasa a la planta industrial, y (c) la **fase industrial** que es la planta de transformación o biorrefinería donde la biomasa se convierte en biobutanol carburante mediante una plataforma bioquímica. La fase agrícola consideró las siguientes etapas: preparación del terreno, siembra, mantenimiento y cosecha. Para el transporte se consideró la capacidad de carga y modelo del camión, la distancia del caso de estudio a la biorrefinería y la cantidad de viajes que realiza el camión para cumplir con los requerimientos de materia prima de la biorrefinería. La fase industrial consideró las etapas de pretratamiento mediante hidratación de la materia prima, una fermentación acetobutílica mediante cultivos mixtos (incluye tres bioprocesos en paralelo), la destilación, la cogeneración y el tratamiento de aguas residuales (Valdez-Vazquez & Sanchez, 2017; Sanchez, *et al.*, 2017).

La unidad funcional fue la producción de 1 MJ de biobutanol carburante.

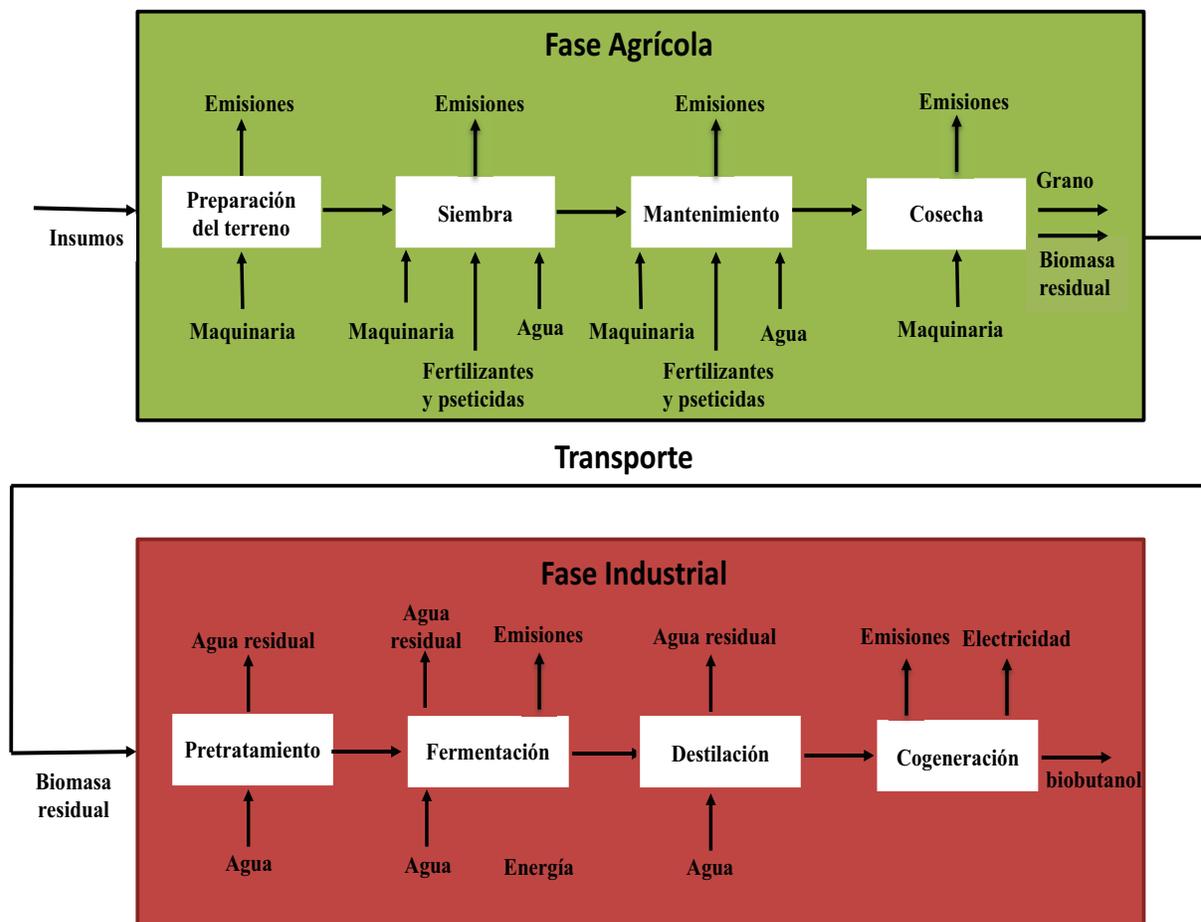


Figura 3. Límites del sistema en la cadena de producción de biobutanol carburante 2G.

6.2. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

Se establecieron dos escenarios de estudio con diferencias en la fase agrícola. El escenario base o convencional (EC) en el cual se mantiene *sin cambios* las prácticas agronómicas aplicadas por los productores en donde la biomasa lignocelulósica residual de los cultivos de trigo o maíz, es decir, los rastrojos y olotes de maíz así como la paja de trigo, se dejan en campo para su incorporación al suelo, se venden como alimento para ganado, o bien son quemados (Figura 4a). El escenario de producción de biobutanol carburante (EButOH) en el cual *se modifican* las prácticas agronómicas y se considera que el 30% de la biomasa lignocelulósica residual se incorpora al suelo, mientras que el 70% se extrae como materia prima para la producción de biobutanol carburante (Figura 4b).

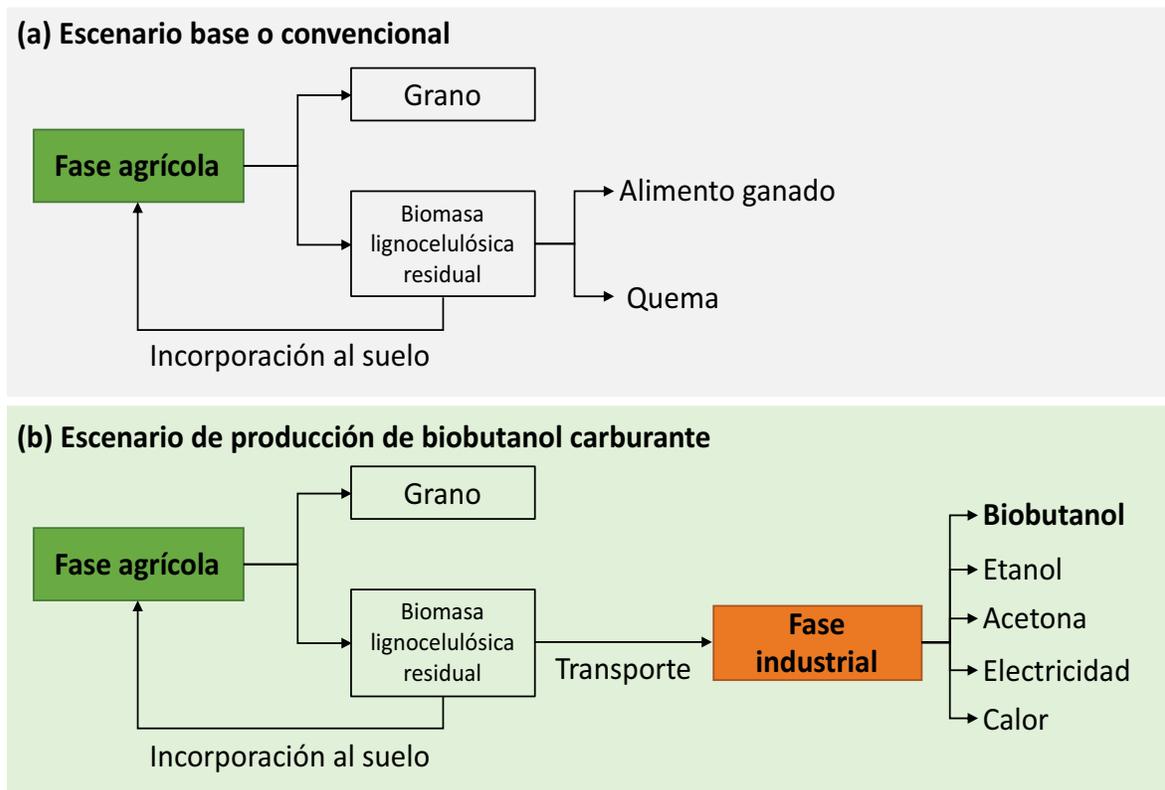


Figura 4. Escenarios de estudio: convencional y de producción de biobutanol carburante.

6.3. DETERMINACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

6.3.1. FASE AGRÍCOLA

La primera fase del trabajo consistió en la determinación de los impactos ambientales en la fase agrícola de la cadena de producción de biobutanol carburante 2G. Para ello se realizó lo siguiente (ver figura 5): (1) se realizó la selección de los *casos de estudio* que estuvieron localizados en municipios donde la producción teórica de biomasa lignocelulósica residual fuera mayor a 500 t/d; (2) se determinó mediante datos de campo el rendimiento de biomasa lignocelulósica residual en t/ha, asimismo se determinó en laboratorio la composición química, (3) se realizó el levantamiento de inventarios de emisiones GEI y consumo de agua, y (4) se calculó la huella de carbono y huella hídrica para la etapa agrícola.

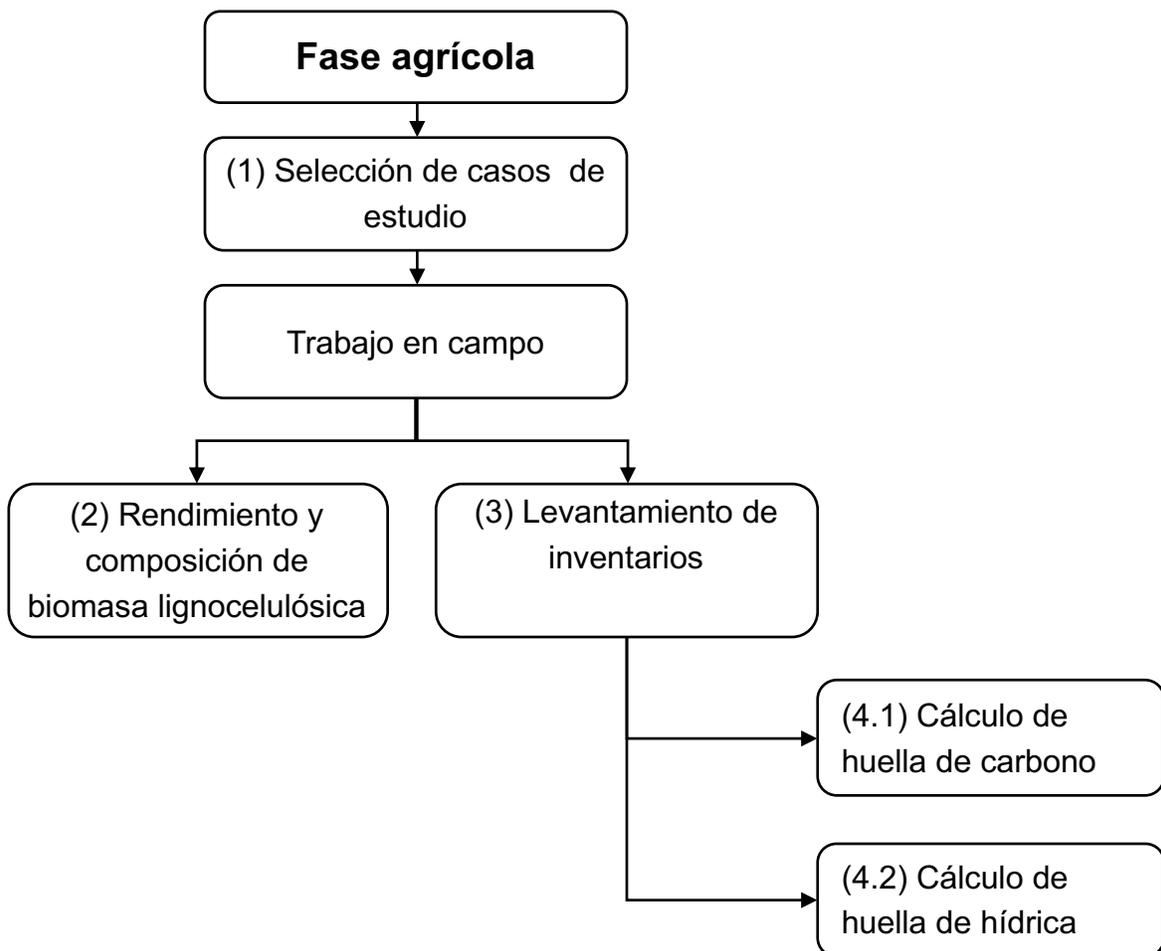


Figura 5. Estrategia experimental para determinar los impactos ambientales en fase agrícola.

6.3.1.1. SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Como criterio de selección de los casos de estudio, se consideraron predios localizados en municipios con un potencial teórico de biomasa residual igual o mayor a 165,000 toneladas de materia seca por año, sin un área máxima únicamente se requirió que se cumpliera el requerimiento de biomasa a nivel municipal. Este es el tamaño mínimo requerido para que una planta industrial de producción de alcoholes 2G sea rentable (Sánchez *et al.*, 2014). El potencial teórico de biomasa residual se calculó con la siguiente ecuación (1):

$$BR = P_{cultivo} \times IR. \quad \dots Ec. 1$$

Donde:

BR	Biomasa residual (t biomasa residual/año)
$P_{Cultivo}$	Producción agrícola (t cultivo/año)
IR	Índice de residuos (t biomasa residual/t cultivo)

Los datos de la producción agrícola de los granos de trigo y maíz, se consultaron de la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) a nivel municipal para los años 2010 a 2015 (SIAP, 2016). El valor de IR se tomó de literatura con los datos mostrados en la Tabla 5.

Con lo anterior, se identificaron en total 9 municipios que cumplieron con el rendimiento de producción de paja de trigo y 15 municipios que cumplieron con el rendimiento de producción de rastrojo de maíz (municipios y rendimientos mostrados en el Anexo E). Sin embargo, tomando en cuenta los criterios de selección, los casos de estudio seleccionados para este trabajo fueron los predios ubicados en los municipios que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Índices de residuos (IR) para la biomasa residual de trigo y maíz.

Tipo de biomasa residual	Índice de residuos (tresiduo/tcultivo)
Rastrojo de maíz	1.5
Olotes de maíz	0.3
Paja de trigo	1.5

Fuente: Valdez-Vazquez et al. (2010)

Tabla 6. Descripción de casos de estudio.

Municipio	Coordenadas	No. de productores	Rendimiento (t/ha)	Superficie de terreno (ha)	Temperatura (°C)	Tipo de suelo predominante	Precipitación media anual (mm)	Elevación (msnm)
Guasave	25°31'3.92"N 108°30'26.64"O	8,000	12	10	Max 45 Min 1	Arcilloso	393	27
Atotonilco el alto	20°40'00"N 102°40'35"O		10	350	Max 31 Min 9	Luvisol Vertisol	900	1,200
Tenancingo	19°02'25"N 99°38'37"O		7	1	Max 20 Min 7	Aluvial	1,200	2,400
Cajeme	27°14'15.48"N 109°50'14.64"O	3,000	6.5	10	Max 48 Min 16	Cambisol, fluvisol, regosol, vertisol	410	46
Mexicali	32°17'48.03"N 115°15'31.84"O	2,000	6.5	10.3	Max 60 Min 3	Yermosoles xerosoles	132	8
Pénjamo	20° 25'44" 101° 42'22"O	2,000	6.5	3.1	Max 34 Min 5	Arcilloso	670	1,700

6.3.1.2. RENDIMIENTO Y COMPOSICIÓN DE BIOMASA

Se realizó trabajo en campo con dos propósitos: determinar el rendimiento de biomasa lignocelulósica residual mediante el índice de residuo (IR) para las variedades y condiciones agroclimáticas prevaletentes en los casos de estudio seleccionados, y para obtener la composición en términos de azúcares.

El valor de IR depende de la variedad del cultivo (Rosillo-Calle *et al.*, 2012), prácticas agronómicas y condiciones agroclimáticas (FAO, 2008). En México, no se encontraron datos consistentes del IR para las variedades de trigo y maíz cultivadas en los casos de estudio seleccionados, haciendo necesaria su determinación en campo. En este trabajo, los valores de IR fueron esenciales para determinar el potencial de biomasa residual real (para cada caso de estudio) y compararlo con el potencial de biomasa teórico (valores promedio, Tabla 5), así como para realizar la asignación de los impactos ambientales.

Para maíz se determinaron dos IR: para el rastrojo y para los olotes. En cuanto al trigo, solo se determinó un IR para la paja. El IR se determinó como la relación entre la biomasa residual en base seca dividida entre la producción del cultivo, de acuerdo a la ecuación 2.

$$IR = \frac{P_{residuo}}{P_{cultivo}} \quad \dots \text{Ec. 2}$$

Donde:

IR	Índice de residuos (t biomasa residual/t cultivo)
P _{residuo}	Producción del residuo (t biomasa residual)
P _{cultivo}	Producción agrícola, grano (t cultivo)

Para cada caso de estudio, se hizo un muestreo aleatorio del cultivo, donde el número de puntos de muestreo se determinó en función del tamaño del terreno de acuerdo a la norma NMX-AA-132-SCFI-2006 para “Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metaloides, manejo de la muestra” (Ver Tabla 7). A su vez, en cada punto de muestreo se tomaron 3 plantas completas. En el caso del maíz, las plantas se cortaron a 5 cm del suelo, a continuación, se separaron hojas y tallos, grano, y olotes. Cada fracción se pesó por separado con ayuda de un dinamómetro con capacidad de 20 kg registrando el peso de la biomasa en húmedo. Para cada caso de estudio (predio) se tomó una muestra compuesta para determinar su contenido de humedad en laboratorio de acuerdo a la norma ASABE S358.2 para forrajes (ASABE Standards, 2008). Para trigo, en cada punto de muestreo se tomó un rollo de aproximadamente 10 plantas completas, las cuales se cortaron a 3 cm del suelo. Se separó paja y grano, y cada fracción se pesó por separado con ayuda de un dinamómetro de 5 kg registrando el peso de la biomasa en húmedo. Se realizó el mismo procedimiento para determinar el contenido de humedad que el maíz. Las muestras compuestas de ambos cultivos fueron almacenadas en bolsas negras bien cerradas y procesadas en un tiempo menor a 5 días.

En el laboratorio, el grano y la biomasa lignocelulósica se secaron en una estufa a 60 °C hasta alcanzar el peso constante. A continuación, se determinó la composición bromatológica de cada biomasa colectada de acuerdo a la metodología reportada por Sluiter et al. (2012).

Tabla 7. Número de puntos de muestreo.

Superficie del terreno (ha)	Número mínimo de puntos de muestreo
1 - 1.99	12
2 - 2.99	14
3- 3.99	16
4 - 4.99	18
6 - 6.99	20
7- 7.99	21
8 - 8.99	22
9 -10.99	23
20-21.99	29

Fuente: NMX-AA-132-SCFI-2006.

6.3.1.3. LEVANTAMIENTO DE INVENTARIOS

Para los casos de estudio seleccionados, se realizaron entrevistas semi-estructuradas a los productores para obtener los datos del inventario de las emisiones de gases efecto invernadero y consumo de agua, dichos inventarios fueron utilizados para el cálculo de la huella de carbono y huella hídrica. El cuestionario empleado fue una adaptación del desarrollado por el Dr. Julio Sacramento Rivero de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) para maíz. Se realizaron modificaciones de acuerdo con las necesidades del cultivo a evaluar. En el ANEXO A se muestra la guía de preguntas realizadas. Las entrevistas semi-estructuradas se realizaron en temporadas de cosecha de los cultivos siendo mayo y diciembre de 2017 para maíz y mayo de 2017 y 2018 para trigo. Los inventarios consideraron la suma de las emisiones y consumo de agua como la suma de un solo ciclo de cultivo comprendido entre 2016-2017.

6.3.1.4. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO (HC)

La determinación de huella de carbono se realizó con ayuda de las ecuaciones reportadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2006), modificado por Ali, *et al*, (2016) y se expresó en kg de CO₂ equivalentes por tonelada de biomasa residual. En donde las emisiones contabilizadas fueron las directas e indirectas de fertilizantes nitrogenados y pesticidas, las emisiones de cambio de uso de suelo, las emisiones de la combustión de maquinaria agrícola y las emisiones por uso de energía eléctrica y combustibles fósiles. Las emisiones contabilizadas fueron las ocasionadas o acumuladas directa e indirectamente durante el cultivo de una hectárea de trigo y maíz.

La huella de carbono se calculó como los Gases Efecto Invernadero totales (GEI totales) entre el rendimiento de biomasa residual (Y) (Ecuación 3).

$$HC_{FA} = \frac{GEI_{totales}}{Y} \quad \dots Ec. 3$$

Donde:

HC _{FA}	Huella de carbono de la fase agrícola (kg CO ₂ eq/t biomasa residual).
Y	Rendimiento de biomasa residual (t biomasa residual/ha).
GEI _{totales}	Total de gases efecto invernadero emitidos en el cultivo (kg CO ₂ eq/ha).

Los gases de efecto invernadero totales se calcularon como la suma de emisiones ocasionadas por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y pesticidas, el uso de la maquinaria, quema de residuos agrícolas y cambio de uso de suelo como se puede ver en la ecuación 4.

$$GEI_{totales} = ED_{N_2O} + EI_{N_2O} + EUM + CUS + EP + EQR \quad \dots Ec. 4$$

Donde:

GEI _{totales}	Total de emisiones de gases efecto invernadero del cultivo (kg CO ₂ eq/ha).
ED _{N₂O}	Emisiones directas de óxido nitroso a causa de fertilizantes (kg CO ₂ eq/ha).
EI _{N₂O}	Emisiones indirectas de óxido nitroso a causa de fertilizantes (kg CO ₂ eq/ha).
EUM	Emisiones por el uso de maquinaria (kg CO ₂ eq/ha).
CUS	Emisiones por cambio de uso de suelo (kg CO ₂ eq/ha).
EP	Emisiones por aplicación de pesticidas (kg CO ₂ eq/ha).
EQR	Emisiones por quema de residuos (kg CO ₂ eq/ha).

ED_{N_2O} Se obtuvieron como resultado de la dosis de aplicación de fertilizantes nitrogenados al cultivo y el nitrógeno en suelo debido a los residuos dejados en campo. Las emisiones directas de óxido nitroso se obtuvieron con la ecuación 5.

$$ED_{N_2O} = AF + RC + CFN \quad \dots \text{Ec. 5}$$

Donde:

ED_{N_2O}	Emisiones directas de N_2O (kg de CO_2 eq/ha).
AF	Emisiones de N_2O por la aplicación de fertilizantes (kg CO_2 eq/ha).
RC	Emisiones de N_2O por los residuos dejados en campo (kg CO_2 eq/ha).
CFN	Emisiones de N_2O por cultivos fijadores de nitrógeno (Estas emisiones no aplican para ninguna de las 2 biomásas).

A su vez, AF se obtuvo a través de la siguiente ecuación (ecuación 6).

$$AF = TA * (0.1) * 0.01 * \frac{44}{28} * 298 \quad \dots \text{Ec. 6}$$

Donde:

TA	Tasa de aplicación de N (kg/ha).
0.1	Fracción total de N de los fertilizantes que es emitido como NO y NH_3 , asumiendo que es 0.1/kg de N aplicado.
0.01	Factor de emisión para la aplicación de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2006. Nivel 1).
298	Unidad de potencial de calentamiento global del N_2O .
$\frac{44}{28}$	Factor de conversión de N_2 a N_2O .

Para RC, se utilizó la ecuación 7.

$$RC = Y * IR * FCR * (0.45) * 0.01 * \frac{44}{28} * 298 \quad \dots \text{Ec. 7}$$

Donde:

Y	Rendimiento del cultivo (kg/ha).
IR	Índice de residuos de maíz y trigo de cada sitio de estudio seleccionado.
FCR	Fracción de residuos del cultivo que se retira del campo como cultivo.
0.45	Concentración reportada de N en residuos (Se supone el mismo valor para ambas biomasa residuales) (Ali <i>et al.</i> , 2016).
0.01	Factor de emisión para la aplicación de fertilizantes nitrogenados (IPCC; 2006. Nivel 1)
298	Unidad de potencial de calentamiento global del N ₂ O.
$\frac{44}{28}$	Factor de conversión de N ₂ a N ₂ O.

Una vez determinada ED_{N₂O}, se procedió con el cálculo de EI_{N₂O} de la Ec.4, que se describen como las pérdidas del nitrógeno aplicado por medio de lixiviación o volatilización. Las emisiones EI_{N₂O} se calcularon con la ecuación 8.

$$EI_{N_2O} = LIX + VOL * \frac{44}{28} * 298 \quad \dots \text{Ec. 8}$$

Donde:

EI _{N₂O}	Emisiones indirectas de N ₂ O del proceso de cultivo (kg de CO ₂ eq/ha).
LIX	Emisiones de lixiviación de N ₂ O (kg de N ₂ O-N/ha).
VOL	Emisiones por volatilización de N ₂ O (kg de N ₂ O-N/ha).
298	Unidad de potencial de calentamiento global del N ₂ O.
$\frac{44}{28}$	Factor de conversión de N ₂ a N ₂ O.

Las emisiones por lixiviación (LIX) se obtuvieron con la ecuación 9. Los resultados se obtuvieron en unidades de kg de CO₂ eq/ha.

$$LIX = NA * 0.30 * 0.0075 \quad \dots \text{Ec. 9}$$

Donde:

NA Cantidad anual de fertilizante N sintético aplicado al suelo (kg/ha).
0.30 Fracción de lixiviado total de N (IPCC, 2006. Nivel 1).
0.0075 Factor por defecto para la lixiviación (IPCC, 2006. Nivel 1).

Por su parte las emisiones por volatilización (VOL), se calcularon con la ecuación que se muestra a continuación (ecuación 10). El resultado se obtuvo en unidades de kg de CO₂ eq/ha.

$$VOL = NA * 0.10 * 0.010 \quad \dots \text{Ec. 10}$$

Donde:

NA Cantidad anual de fertilizante N sintético aplicado al suelo (kg/ha).
0.10 Fracción de lixiviado total de N (IPCC, 2006. Nivel 1).
0.010 factor por defecto para la lixiviación (IPCC, 2006. Nivel 1).

Una vez determinadas las emisiones directas e indirectas del óxido nitroso, se procedió a realizar el cálculo de las emisiones de pesticidas (EP) de la ecuación 4. Estas emisiones varían de acuerdo a los contenidos químicos de cada pesticida y se obtuvieron con la ecuación 11. Se tomaron en cuenta el pesticida aplicado (PA) y el factor de emisión de cada compuesto químico, los cuales se tomaron del artículo de Lal (2004).

$$EP = PA * FEP \quad \dots \text{Ec. 11}$$

Donde:

EP Emisiones por pesticidas (kg de CO₂ eq/ha).
PA Concentración de pesticida aplicado (kg/ha).
FEP Factor de emisión de pesticidas kg CO₂ eq/kg (herbicidas 6.3, insecticida 5.1 fungicida 3.9).

Una vez calculadas las emisiones por uso de pesticidas, se realizó el cálculo de las emisiones por la combustión de la maquinaria (EUM) contabilizadas en la ecuación 4, estas se obtuvieron en kg de CO₂ eq/ha, con la ecuación 12. Los factores de emisión se tomaron del IPCC, 2006. Nivel 1.

$$EUM = 2.6 * Fc * TOP * 1.2 \quad \dots \text{Ec. 12}$$

Donde:

EUM	Emisiones de GEI del uso de maquinaria en el proceso (kg/ha).
2.6	Factor de emisión de carbono equivalente para operaciones de campo (kg CO ₂ eq/L).
Fc	Consumo de combustible en operaciones de campo (L/ha).
TOP	Cantidad de veces que se realiza una operación o actividad.
1.24	Tasa de producción de combustible.

Finalmente se realizó el cálculo de las emisiones por quema de residuos de cultivo (EQR), para los casos en donde se lleve a cabo la actividad. La ecuación utilizada fue la 13, y los resultados se expresaron en kg de CO₂ eq por hectárea.

$$EQR = A * RDQ * FC * FE * FCO * 10^{-3} \quad \dots \text{Ec. 13}$$

Donde:

EQR	Emisiones por quema de residuos de cultivo (kg CO ₂ eq/ha).
RDQ	Residuos disponibles para la quema (kg/ha). Obtenidos con el IR.
FC	Factor de combustión (0.9 trigo, 0.8 maíz. IPCC, 2006. Nivel 1).
FE	Factor de emisión (g/kg, coeficiente que cuantifican las emisiones del gas por el valor de biomasa quemada) (CH ₄ = 2.7, CO = 92, N ₂ O = 0.007, NO _x = 2.5, CO ₂ = 1515).
PCG	Potencial de calentamiento global (GEI/CO ₂). (CH ₄ = 25, CO = 1.9, N ₂ O = 298, NO _x = 2.5, CO ₂ = 1).
10 ⁻³	Factor de conversión de gramos a kg de GEI.

6.3.1.5. CÁLCULO DE HUELLA HÍDRICA (HH)

La huella hídrica de la fase agrícola se calculó con apoyo en la metodologías de Scarpare et al. (2016) y Renderos (2016) y se expresó en metro cúbico por tonelada de cultivo. Los impactos de entrada evaluados para la huella hídrica fueron el uso de agua superficial, uso de agua pluvial y agua residual producida.

La huella hídrica total se calculó como la suma de la huella hídrica azul (HH_{azul}), que representa el agua superficial utilizada para el riego del cultivo, la huella hídrica verde (HH_{verde}), que es el agua pluvial aprovechada por el cultivo para su desarrollo y la huella hídrica gris (HH_{gris}) la cual indica el agua requerida para asimilar los contaminantes del cultivo hasta concentraciones naturales. La huella hídrica total de la fase agrícola se calculó con la ecuación 14.

$$HH_{FA} = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} \quad \dots \text{Ec. 14}$$

Donde:

HH_{FA}	Huella hídrica total del proceso del cultivo (m^3/t biomasa residual).
HH_{azul}	Huella hídrica azul del proceso de cultivo (m^3/t biomasa residual).
HH_{verde}	Huella hídrica verde del proceso (m^3/t biomasa residual).
HH_{gris}	Huella hídrica gris del proceso (m^3/t biomasa residual).

La huella hídrica verde se calculó como el consumo total de agua pluvial (CAV_{total}) entre el rendimiento de biomasa residual (Y) como se muestra en la ecuación 15.

$$HH_{verde} = \frac{CAV_{total}}{Y} \quad \dots \text{EC. 15}$$

Donde:

HH_{verde}	Huella Hídrica verde (m^3/t biomasa residual).
CAV_{total}	Consumo de agua verde total en el cultivo (m^3/ha).
Y	Rendimiento de biomasa residual (t biomasa residual/ha).

El CAV_{total} se calculó como la sumatoria del valor de evapotranspiración real del cultivo (ET_c), desde el día de siembra ($d=1$) hasta el día de la cosecha ($d=n$). Ver ecuación 16.

$$CAV_{total} = 10 * \sum_{d=1}^{d=n} ET_c \quad \dots Ec. 16$$

Donde:

CAV_{total} Consumo de agua verde total (m^3/ha).
 ET_c Evapotranspiración del cultivo ($mm/día$).
 10 Factor para transformar los $mm/día$ a m^3/ha .

A su vez ET_c se obtuvo de la multiplicación del coeficiente del cultivo (k_c) por el valor de evapotranspiración de referencia (ET_0) como se muestra en la ecuación 17. La evapotranspiración real del cultivo será igual al requerimiento de agua del cultivo, suponiendo que las necesidades de agua de los cultivos se cumplen plenamente.

$$ET_c = k_c * ET_0 \quad \dots Ec. 17$$

Donde:

ET_c Valor de evapotranspiración real del cultivo ($mm/día$).
 ET_0 Valor de evapotranspiración de referencia ($mm/día$) (Plataforma INIFAP).
 K_c Coeficiente del cultivo (adimensional). (0.25, 0.7 y 1.15 para trigo y 0.35, 0.6 y 1.2 para maíz seleccionando el dato de acuerdo a la etapa de crecimiento del cultivo, software CROPWAT 8.0).

Ya calculado CAV_{total} , se comparó con la precipitación efectiva y se estableció que: Si la ET_c calculada era mayor que la precipitación efectiva ($pcpn$), se tomaría esta última como CAV_{total} , sin embargo, si la ET_c calculada era menor que la precipitación efectiva ($pcpn$), se tomaría la ET_c calculada como CAV_{total} , como se muestra en las ecuaciones 18 y 19 respectivamente. La precipitación efectiva se calculó a través del software CROPWAT 8.0. Lo anterior se decidió debido a que en algunos casos el cultivo requería más agua pluvial de

la que se presentaba o en algunos casos se presentó mayor cantidad de agua pluvial de la que se requería.

$$\text{Si } ET_C > \text{pcpn entonces } CAV_{total} = ET_C \quad \dots \text{Ec. 18}$$

$$\text{Si } ET_C < \text{pcpn entonces } CAV_{total} = \text{pcpn} \quad \dots \text{Ec. 19}$$

La HH_{azul} por su parte, se calculó como el consumo de agua superficial total empleada para el riego del cultivo (CAA_{total}) entre el rendimiento de biomasa residual.

$$HH_{azul} = \frac{CAA_{total}}{Y} \quad \dots \text{Ec. 20}$$

Donde:

HH_{azul}	Huella Hídrica azul (m^3/t biomasa residual).
CAA_{total}	Consumo de agua azul total en el cultivo (m^3/ha).
Y	Rendimiento de biomasa residual (t/ha).

El CAA_{total} se tomó como el requerimiento de irrigación del cultivo y se calculó como la diferencia entre ET_C y el CAV_{total} (ecuación 21). Por lo que, si ET_C es menor que el CAV_{total} , el requerimiento de irrigación es cero, ya que el agua pluvial cumple por completo con los requerimientos hídricos del cultivo. Por otro lado, si el ET_C es mayor que CAV_{total} el valor de irrigación será el agua regada para satisfacer las necesidades del cultivo, la cual será tomada como el consumo de agua azul total.

$$CAA_{total} = (ET_C - CAV_{total}) * 10 \quad \dots \text{Ec. 21}$$

Donde:

CAA_{total}	Consumo de agua azul total por irrigación (m^3/ha).
ET_C	Valor de evapotranspiración real del cultivo ($mm/día$).
CAV_{total}	Consumo de agua verde total ($mm/día$).
10	Factor de conversión de $mm/día$ a m^3/ha .

La HH_{gris} por su parte se calculó con la ecuación que se muestra a continuación (ecuación 22).

$$HH_{gris} = \frac{\alpha \times TA}{Y_t \times (C_{max} - C_{nat})} \quad \dots \text{Ec. 22}$$

Donde:

HH_{gris}	Huella gris (m^3/t biomasa residual).
α	Fracción de escorrentía de lixiviación.
TA	Tasa de aplicación de N (kgN/ha).
C_{max}	Concentración máxima aceptable de contaminante (kg/m^3).
C_{nat}	Concentración natural para el contaminante considerado (kg/m^3).
Y_t	Rendimiento de la biomasa residual (t biomasa residual/ ha).

6.3.1.6. ASIGNACIÓN DE IMPACTOS

En un proceso de producción, por lo general existen productos y subproductos, tal es el caso de la fase agrícola de la cadena de producción de biobutanol, en donde se obtiene el grano y la biomasa lignocelulósica residual, por lo que los impactos ambientales estimados, deben ser repartidos (asignados) entre los productos y subproductos, en este caso se realiza una asignación entre el grano y la biomasa lignocelulósica residual. La distribución de los impactos ambientales entre productos y subproductos, se maneja de distintas maneras pudiéndose realizar una combinación de métodos. Para este trabajo la asignación se llevó a cabo empleando el método de criterios de atribución el cual emplea un atributo de los productos generados como parámetro para realizar el reparto de las emisiones totales entre ellos. Los atributos tomados en cuenta fueron la masa (atribución másica) y el valor económico (atribución económica) (Aylott *et al.*, 2011; Väisänen *et al.*, 2016; Sacramento *et al.*, 2017). En la Figura 6 se muestra un ejemplo del proceso de asignación de impactos según la fracción másica y económica.

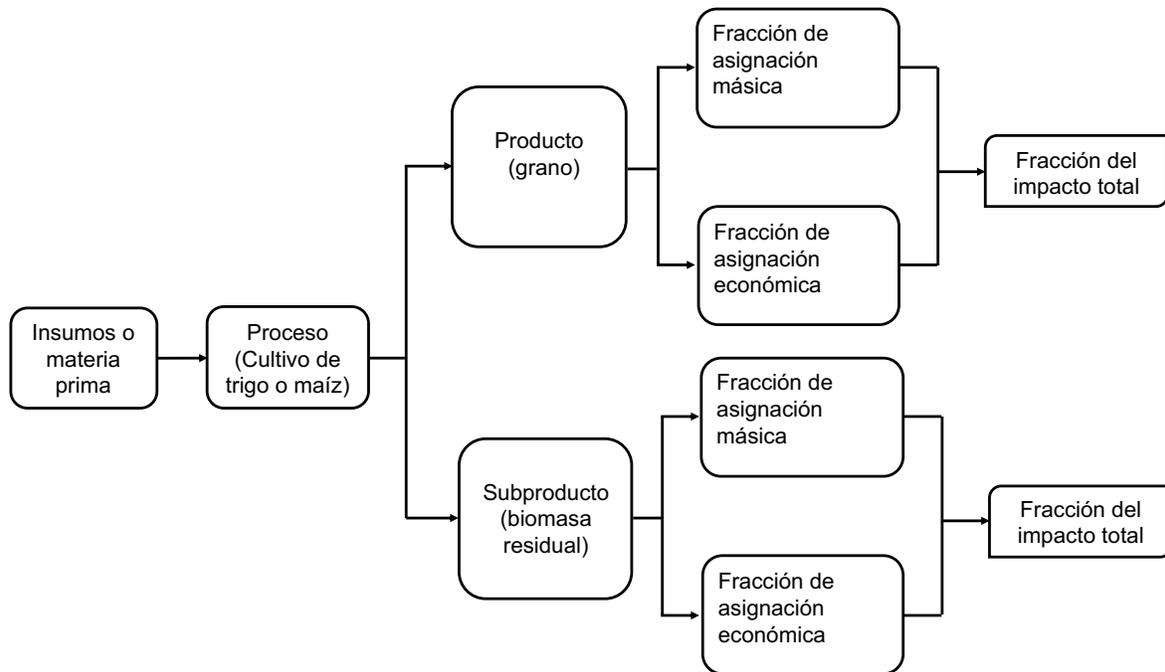


Figura 6. Ejemplo de proceso de asignación de impactos según la fracción másica y económica.

Para la asignación de impactos se calculó la fracción de asignación correspondiente a la biomasa residual y al grano. El cálculo se realizó con la ecuación 23 (Scholten, 2009) y se ejemplifica para la biomasa residual, sin embargo para el cálculo de la fracción de asignación del grano se emplea la misma metodología tomando en cuenta los atributos másicos y económicos correspondientes.

$$FA_{br} = \frac{FM_{br} * FV_{br}}{\sum FM * FV} \quad \dots Ec. 23$$

Donde:

- FA_{br} Fracción de asignación de la biomasa residual.
- FM_{br} Fracción másica de la biomasa residual.
- FV_{br} Fracción valor de la biomasa residual.
- FM Suma de la fracción másica de grano y biomasa residual.
- FV Suma de la fracción valor de grano y biomasa residual.

La FM_{br} se obtuvo dividiendo el rendimiento de la biomasa residual entre la suma del rendimiento de la biomasa residual y el rendimiento del grano. El rendimiento de biomasa residual se calculó con el IR de los datos obtenidos en la sección 6.3.1.2. Para la FM_{br} se utilizó la ecuación 24.

$$FM_{br} = \frac{Y_{br}}{Y_{br} + Y_{gr}} \quad \dots Ec. 24$$

Donde:

FM_{br} Fracción másica de la biomasa residual.
 Y_{br} Rendimiento de la biomasa residual (t/ha).
 Y_{gr} Rendimiento de grano (t/ha).

La FV_{br} se calculó dividiendo el costo de la biomasa residual entre la suma del costo de la biomasa residual y el grano. Los costos utilizados por tonelada de grano fueron de \$ 3,600.00 y \$ 3,900.00 para trigo y maíz, respectivamente (Burgess, 2018). Los costos de la biomasa residual se estableció en \$ 480.00 para ambos casos (dato obtenido de las entrevistas semi-estructuradas descritas en 6.3.1.3).

$$FV_{br} = \frac{costo_{br}}{costo_{br} + costo_{gr}} \quad \dots Ec. 25$$

Donde:

FV_{br} Fracción valor de la biomasa residual.
 Y_{br} Costo de la biomasa residual (\$/t).
 Y_{gr} Costo de grano (\$/t).

6.3.2. TRANSPORTE DE BIOMASA RESIDUAL

Una vez finalizada la determinación de los impactos ambientales en la fase agrícola, se procedió al cálculo de los impactos ambientales ocasionados por el transporte de la biomasa residual a la biorrefinería.

Para obtener la huella de carbono y huella hídrica en el transporte, se estableció el transporte de 1,000 t de biomasa residual por día a la biorrefinería. En el caso de que un sólo municipio no logrará cumplir esta capacidad de planta, se consideraron otros municipios cercanos. Las distancias a la biorrefinería se obtuvieron a través de un análisis de polígono (Orduña-Serrano, *et al.*, 2018). En la Tabla 8 se muestran los casos de estudio, sus rendimientos de biomasa residual y el conjunto de municipios que cumplen con los requerimientos, además de las distancias obtenidas del análisis realizado.

Tabla 8. Municipios, capacidad de suministro de biomasa y distancias a la biorrefinería.

Municipio	Ubicación biorrefinería	Municipios que suministran biomasa residual	Capacidad (t/día)	Distancia (Km)
Cajeme	Cajeme	Cajeme	1000	10
Mexicali	Mexicali	Mexicali	1000	10
Pénjamo	Abasolo	Abasolo	134	7
		Cuaremaro	51	48
		Huanimaro	42	17
		Pénjamo	254	34
		Salamanca	110	54
		Salvatierra	43	93
		Valle de Santiago	50	34
		Villagran	39	74
		Guasave	Gabriel Leiva Solano	Gabriel Leiva Solano
Atotonilco	Atotonilco	Atotonilco	1000	15.4
Tenancingo	Acambay	Acambay	246	0
		Aculco	173	23.8
		Jilotepec	198	45.7
		Atlacomulco	195	20.6
		Temascalcingo	203	24.4

Para el cálculo de huella de carbono por transporte se empleó la ecuación de emisiones de maquinaria reportada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2006), modificado por Ali et al. (2016) y se expresó en kg de CO₂ eq/t de biomasa residual.

$$HC_{TR} = \frac{2.6 * TOP * Fc * 1.2}{CC} \quad \dots Ec. 26$$

Donde:

HC _{TR}	Huella de carbono por uso de maquinaria en el transporte (kg CO ₂ e /t).
2.6	Factor de emisión de carbono equivalente para las operaciones de campo (kg CO ₂ eq/L) (IPCC, nivel 1, para diésel).
Fc	Consumo de combustible por transporte (L).
TOP	Cantidad de veces que se realiza una operación o actividad.
1.2	Tasa de producción de combustible (IPCC, Nivel 1).
CC	Capacidad del camión (Se supuso un camión de 13 toneladas).

La cantidad de veces que se realiza una operación (TOP) se refiere en este caso en particular a las veces que el camión se trasladará del caso de estudio a la biorrefinería para cumplir con sus requerimientos de biomasa residual. TOP se calculó con la ecuación 27.

$$TOP = \frac{YD}{CC} \quad \dots Ec. 27$$

Donde:

TOP	Cantidad de veces que el camión se traslada de un lugar a otro.
YD	Rendimiento de biomasa residual por caso de estudio al día (t/día).
CC	Capacidad del camión (se supuso un camión con capacidad de 13 toneladas).

Por su parte, Fc se calculó como el cociente de los km de distancia del campo a la biorrefinería y el consumo de diésel del camión por km (ecuación 28).

$$FC = \frac{d}{Cd} \quad \dots \text{Ec. 28}$$

Donde:

FC	Consumo de combustible por transporte (L).
d	Distancia del caso de estudio a la biorrefinería (km).
Cd	Consumo de diésel empleado por km (km/L).

Cabe mencionar, que en los casos de estudio en donde se requirió más de un municipio para cumplir con la biomasa residual a ser transportada, el TOP y FC de cada municipio se sumaron antes de meterse en la ecuación general para tener el total de emisiones para el transporte a cada caso de estudio.

En el caso de transporte, no se realizó el cálculo de la huella hídrica ya que en el traslado de la biomasa residual a la biorrefinería no se presenta consumo de agua como tal, únicamente se consume agua en la producción del diésel, sien embargo, el diésel es un insumo y los impactos por producción de insumos no estan dentro de los límites del sistema.

6.3.3. FASE INDUSTRIAL

Ya finalizadas el cálculo de la huella de carbono y huella hídrica de la Fase Agrícola y Transporte, se obtuvieron la huella de carbono y huella hídrica de la Fase Industrial (biorrefinería). Para la fase industrial, se estableció como modelo una biorrefinería de plataforma bioquímica que incluye una hidratación, tres bioprocesos basados en cultivos mixtos, la destilación y la cogeneración (Sanchez, *et al.*, 2017; Valdez-Vazquez & Sanchez, 2017;). La capacidad mínima establecida para la biorrefinería fue de 1,000 t de biomasa residual al día, para que el costo de butanol sea rentable (Valdez-Vazquez & Sanchez, 2018). El diseño del proceso de la biorrefinería se muestra en la Figura 7. Las emisiones y consumo de agua totales para el cálculo de la huella de carbono y huella hídrica se obtuvieron de los resultados publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) donde se utilizó el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA), donde además se reportó el rendimiento de butanol de la biorrefinería, haciendo los cambios para cada caso de estudio utilizando los datos de composición descritos en 6.3.1.2.

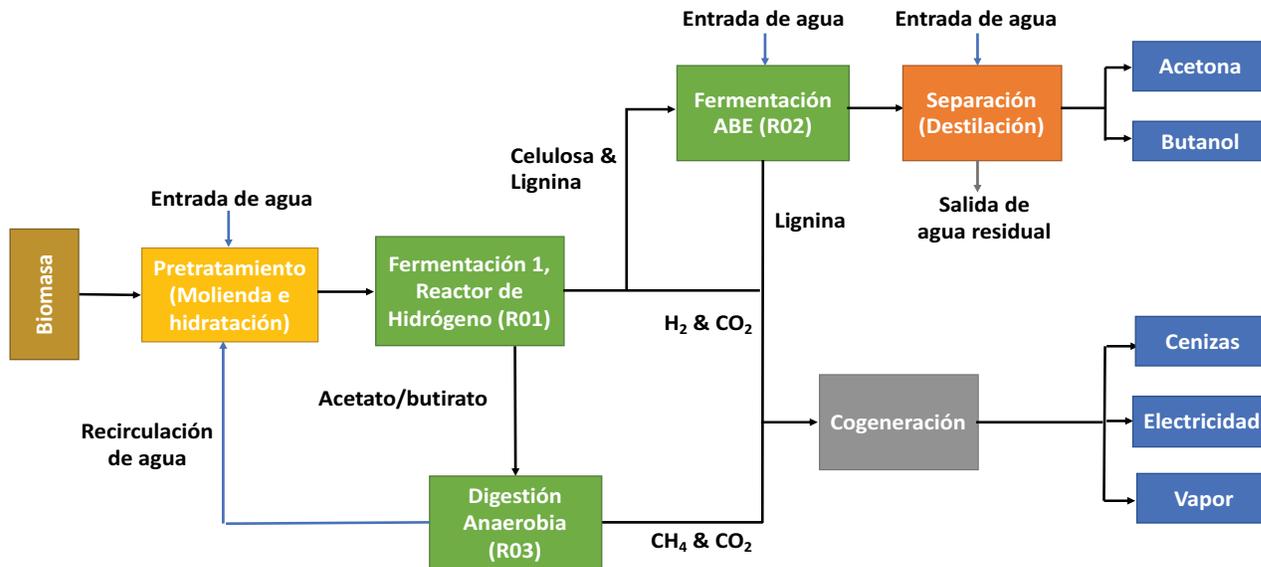


Figura 7. Biorrefinería bioquímica basada en cultivos mixtos para la producción de biobutanol carburante (Valdez-Vazquez & Sanchez, 2017).

6.3.3.1. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO (HC)

Para la determinación de la huella de carbono de la fase industrial, se utilizó la ecuación reportada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2006), modificado por Ali et al. (2016) y se expresó en kg de CO₂ eq/t de biomasa residual. Las emisiones contabilizadas en ésta fase fueron las emisiones de CO₂ generadas en: el reactor de hidrógeno (fermentación), el reactor de producción de acetona-butanol-etanol (ABE), el reactor de la digestión anaerobia y la cogeneración. Las emisiones se tomaron por el procesamiento de una tonelada de paja de trigo o rastrojo de maíz por día.

La huella de carbono se calculó como el cociente del total de gases efecto invernadero (GEI), en este caso en particular enfocado únicamente al CO₂, y la cantidad de biomasa residual alimentada a la planta (ecuación 29).

$$HC_{FI} = \frac{CO_2 \text{ total}}{AL} \quad \dots \text{Ec. 29}$$

Donde:

HC _{FI}	Huella de carbono total de la biorrefinería (kg CO ₂ eq/t biomasa residual).
AL	Biomasa residual alimentada a la planta (t).
CO ₂ total	Total de CO ₂ emitido en el proceso (kg CO ₂ eq).

El total de CO₂ eq emitido en el proceso, se obtuvo de los resultados publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) donde se utilizó el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA). Con el software, los autores realizaron la simulación del proceso de la biorrefinería, arrojando como resultados los balances de masa y energía de cada operación unitaria, de los cuales se obtuvieron los datos de emisiones de CO₂. Para obtener las emisiones sólo se consideraron las características de operación del proceso en el simulador, tales como volúmenes de trabajo, tiempos de retención hidráulica (TRH), valores de conversión de las reacciones, entre otros. Finalmente, de cada operación unitaria se tomó el valor de emisiones de CO₂ arrojados como resultado de la simulación, realizando una suma final, siendo este total de CO₂ emitido utilizado en la ecuación general. Las condiciones de operación finales establecidas para cada operación unitaria del proceso fueron las siguientes: la composición de entrada de la biomasa residual se cambió de la preestablecida en el simulador, por la obtenida con el análisis de NREL realizado a las muestras obtenidas en campo (ver 6.3.1.2). La composición se modificó de acuerdo a cada caso de estudio y los componentes modificados fueron: otros sólidos (extractivos), celulosa, hemicelulosa, lignina, cenizas y el porcentaje (%) de humedad presente en la biomasa residual. El reactor de hidrógeno (primera fermentación, R01 Figura 7) se fijó con las siguientes condiciones de operación: volumen de trabajo del reactor fue de 75%, el TRH se fijó de 6.6 días a una temperatura de 37° C, las reacciones bioquímicas que tienen lugar en R01 y sus porcentajes de conversión se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor de hidrógeno R01

Reacciones	% de conversión
1.00 otros sólidos + 1.00 H ₂ O → 1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆	95
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2.00 H ₂ O → 2.00 CH ₃ COOH + 2.00 CO ₂ + 4.00 H ₂	80
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2.00 H ₂ O → 1.00 C ₄ H ₈ O ₂ + 2.82 CO ₂ + 2.00 H ₂	93
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ → 6.00 células + 1.80 H ₂ O	100
1.00 H ₂ O + 1.00 Xilano → 1.00 C ₅ H ₁₀ O ₅	95
1.69 H ₂ O + 1.00 C ₅ H ₁₀ O ₅ → 1.67 CH ₃ COOH + 1.67 CO ₂ + 3.33 H ₂	95
1.00 C ₅ H ₁₀ O ₅ → 0.83 C ₄ H ₈ O ₂ + 1.62 CO ₂ + 1.67 H ₂	93
1.00 C ₅ H ₁₀ O ₅ → 5.00 células + 1.50 H ₂ O	100

El reactor de fermentación a acetona-butanol-etanol (ABE R02, Figura 7) tuvo las siguientes condiciones de operación: volumen de trabajo del reactor fue del 75%, el TRH se mantuvo de 6.6 días a una temperatura de 37° C, las reacciones bioquímicas que tienen lugar en R02 y sus porcentajes (%) de conversión se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor ABE R02

Reacciones	% de Conversión
1.00 celulosa + 1.00 H ₂ O → 1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆	100
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ + 1.00 H ₂ O → 1.00 C ₃ H ₆ O + 3.00 CO ₂ + 4.00 H ₂	30
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ → 2.00 CO ₂ + 2.00 C ₂ H ₆ O	10
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ → 1.00 C ₄ H ₁₀ O + 2.00 CO ₂ + 1.00 H ₂ O	95
1.00 C ₆ H ₁₂ O ₆ → 6.00 células + 1.80 H ₂ O	2

Por su parte el reactor metanogénico (digestión anaerobia R03, figura 7) presentó las siguientes condiciones de operación: volumen de trabajo del reactor fue del 75%, el TRH se mantuvo de 10 h a una temperatura de 36° C, las reacciones bioquímicas ocurridas en R03 y sus porcentajes (%) de conversión muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Reacciones bioquímicas y conversión en el reactor metanogénico R03

Reacciones	% de conversión
1.00 CH ₃ COOH → 1.00 CO ₂ + 1.00 CH ₄	95
1.00 C ₄ H ₈ O ₂ + 1.00 H ₂ O → 1.5 CO ₂ + 2.50 CH ₄	90
1.00 CH ₃ COOH → 2.4 células	3
1.00 C ₄ H ₈ O ₂ → 3.5 células	30

6.3.3.2. CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA (HH)

La huella hídrica de la fase industrial se calculó en base a la metodología reportada por Scarpore et al. (2016), y se expresó en metro cúbico por t de biomasa residual. El consumo de agua contabilizada en esta fase, fueron las entradas de agua dulce en: el reactor de hidratación, el reactor ABE (R02) la producción de vapor y las torres de destilación. El consumo de agua se tomó por el procesamiento de una tonelada de paja de trigo o rastrojo de maíz.

La huella hídrica total se calculó como la suma de la huella hídrica azul (HH_{azul}), que representa el agua superficial utilizada en el proceso, la huella hídrica verde (HH_{verde}), que es el agua pluvial aprovechada en el proceso y la huella hídrica gris (HH_{gris}) la cual indica el agua requerida para asimilar los contaminantes del proceso hasta concentraciones naturales.

La huella hídrica total se calculó con la ecuación 30.

$$HH_{FI} = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} \quad \dots Ec. 30$$

Donde:

HH_{FI}	Huella hídrica total del proceso (m^3/t biomasa residual).
HH_{azul}	Huella hídrica azul del proceso (m^3/t biomasa residual).
HH_{verde}	Huella hídrica verde del proceso (m^3/t biomasa residual).
HH_{gris}	Huella hídrica gris del proceso (m^3/t biomasa residual).

A su vez, la huella hídrica azul se calculó como la división del consumo de agua azul total del proceso de producción de biobutanol, entre la alimentación de biomasa residual que es alimentado a la biorrefinería.

$$HH_{azul} = \frac{CAA_{total}}{AL} \quad \dots Ec. 31$$

Donde:

HH_{azul}	Huella Hídrica azul (m^3/t biomasa residual).
CAA_{total}	Consumo de agua azul total en el cultivo (m^3).
AL	Biomasa residual alimentada a la planta (t biomasa residual).

El consumo total de agua superficial, se tuvo de los resultados publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) donde se utilizó el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA). Con el software, los autores realizaron la simulación del proceso de la biorrefinería, arrojando como resultados las entradas y salidas del recurso hídrico en cada operación unitaria. Para identificar los consumos de agua se consideraron algunas características de operación del proceso, tales como volúmenes de trabajo, tiempos de retención hidráulica (TRH), además de identificar los caudales de salida que eran recirculados para alguna otra operación unitaria. Finalmente, de cada operación unitaria se tomó el valor de consumo de agua resultante de la simulación. Posteriormente se realizó la suma total del consumo de agua de las operaciones unitarias, siendo esto el valor total de agua azul consumida utilizado en la ecuación general. Las condiciones de operación finales establecidas para cada operación unitaria del proceso fueron las siguientes:

La composición de entrada de la biomasa residual, se cambió de la preestablecida en el simulador, por la obtenida con el análisis de NREL realizado a las muestras adquiridas en campo. La composición se modificó de acuerdo a cada caso de estudio y los componentes modificados fueron: otros sólidos (extractivos), celulosa, hemicelulosa, lignina, cenizas y el porcentaje (%) de humedad presente en la biomasa residual.

Para el proceso de hidratación se establecieron las siguientes condiciones de operación: volumen de trabajo del reactor fue de 75%, el TRH se mantuvo en 4 h y se trabajó a una temperatura de 31° C, se estableció trabajar a 10% de sólidos totales (ST) y las reacciones bioquímicas ocurridas para la transformación de la biomasa residual a butanol se mantuvieron iguales a las establecidas en el simulador.

Para este caso se realizó el cálculo en base a la alimentación de las 1,000 t de biomasa residual a la biorrefinería con una humedad en la biomasa residual del 10%. El cálculo de consumo de agua se realizó con la ecuación 32.

$$CA = \frac{AL_S * 90\%}{10\%} \quad \dots \text{Ec. 32}$$

Donde:

- CA Consumo de agua de operación unitaria a 10% ST.
- AL_S Biomasa residual alimentada seca (t biomasa residual/día)
- 10% Porcentaje que equivale a los ST.
- 90% Porcentaje de agua que equivale a lo necesario para estar a 10% de ST.

El reactor ABE (R02) presentó también entrada de agua superficial, empleando las siguientes condiciones de operación: el volumen de trabajo del reactor fue de 75%, el TRH se mantuvo de 6.6 días y se trabajó a una temperatura de 37° C. El valor de consumo de agua superficial se calculó en base a un porcentaje de trabajo de ST del 10%. De los balances de masa del simulador, se obtuvo el rendimiento de biomasa residual de entrada al reactor ABE, que posteriormente se empleó en la ecuación 32 para calcular el consumo de agua en esta operación unitaria.

El reactor metanogénico (R03) presentó las condiciones de operación siguientes: volumen de trabajo del reactor fue del 75%, el TRH se mantuvo de 10 h y se trabajó a una temperatura de 36° C. De acuerdo a los balances obtenidos de la simulación, se observó que el agua que sale del reactor metanogénico se recircula al reactor de hidratación, por lo que fue necesario el restarle al reactor de hidratación el agua saliente del reactor metanogénico.

Por su parte, la huella hídrica gris se calculó con la ecuación 33 y se tomó como la producción de agua residual producida en las operaciones unitarias entre la alimentación de biomasa residual a la biorrefinería (Ecuación 33).

$$HH_{gris} = \frac{PAG_{total}}{AL} \quad \dots Ec. 33$$

Donde:

HH_{gris}	Huella gris del proceso (m^3/t biomasa residual).
PAG_{total}	Producción de agua gris en el proceso (m^3).
AL	Rendimiento de biomasa residual alimentada a la biorrefinería (t).

La producción total de agua gris, se tuvo de los resultados publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) donde se utilizó el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA). Y de igual manera que con la HH_{azul} se consultaron los balances de entradas y salidas. En el caso de la producción de agua gris, la única operación unitaria que la produjo fue la torre de destilación, y la cantidad total de agua residual producida se obtuvo directamente del simulador.

La HH_{verde} , no se contabilizó en este caso, ya que en ninguna parte del proceso se emplea agua de lluvia, por lo que, para el cálculo de la huella hídrica total, el valor de la HH_{verde} es igual a cero.

6.4. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS DE LA CADENA DE PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL.

Ya finalizadas las tres fases del trabajo en las cuales se calcularon la HC y HH de cada una, se procedió a la integración de resultados para conocer el impacto ambiental medido como HC y HH en la producción de 1 MJ de energía.

6.4.1. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO GLOBAL

La huella de carbono de la cadena de producción de biobutanol, se obtuvo como el cociente de la sumatoria de la HC de las tres fases del trabajo y el rendimiento energético de una tonelada de biomasa residual (ecuación 34).

$$HC = \frac{\sum HC}{Y_e} \quad \dots \text{Ec. 34}$$

Donde:

HC	Huella de carbono de la cadena de producción de biobutanol (kg CO ₂ /MJ).
ΣHC	Suma de HC de las tres fases del trabajo (kg CO ₂ /t de biomasa residual).
Y _e	Rendimiento energético (MJ/t de biomasa residual).

La HC total de las tres fases de este trabajo se obtuvo sumando la HC de cada una de las fases como se muestra en la ecuación 35.

$$\sum HC = HC_{FA} + HC_{TR} + HC_{FI} \quad \dots \text{Ec. 35}$$

Donde:

ΣHC	Suma de HC de las tres fases del trabajo (kg CO ₂ /t de biomasa residual).
HC _{FA}	Huella de carbono de la fase agrícola (kg CO ₂ /t de biomasa residual).
HC _{TR}	Huella de carbono de la fase de transporte (kg CO ₂ /t de biomasa residual).
HC _{FI}	Huella de carbono de la fase Industrial (kg CO ₂ /t de biomasa residual).

Por otra parte, Y_e se refiere a la capacidad energética del biobutanol producido con una tonelada de biomasa residual. Se calculó como el producto del total de biobutanol producido en la biorrefinería y el poder calorífico del biobutanol como se muestra en la ecuación 36.

$$Y_e = BB_p * PC_{BB} \quad \dots \text{Ec. 36}$$

Donde:

Y _e	Rendimiento energético (MJ/t de biomasa residual).
BB _p	Biobutanol producido en la biorrefinería (kg/t de biomasa residual).
PC _{BB}	Poder calorífico del biobutanol (MJ/kg de biobutanol). Se tomó como poder calorífico un valor de 37 MJ/kg (National Center for Biotechnology information, 2018).

6.4.2. CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA GLOBAL

La huella de hídrica de la cadena de producción de biobutanol, se obtuvo dividiendo la sumatoria de la HH de las tres fases del trabajo y el rendimiento energético de una tonelada de biomasa residual (ecuación 37).

$$HH = \frac{\sum HH}{Y_e} \quad \dots \text{Ec. 37}$$

Donde:

HH	Huella hídrica de la cadena de producción de biobutanol (m ³ /MJ).
ΣHH	Suma de HH de las tres fases del trabajo (m ³ /t de biomasa residual).
Y _e	Rendimiento energético (MJ/t de biomasa residual).

La HH total se obtuvo sumando la HH de cada una de las fases como se muestra en la ecuación 38.

$$\sum HH = HH_{FA} + HH_{FI} \quad \dots \text{Ec. 38}$$

Donde:

ΣHH	Suma de HH de las tres fases del trabajo (m ³ /t de biomasa residual).
HH _{FA}	Huella hídrica de la fase agrícola (kg CO ₂ /t de biomasa residual).
HH _{FI}	Huella de hídrica de la fase Industrial (kg CO ₂ /t de biomasa residual).

Por otra parte, Y_e se refiere a la capacidad energética del biobutanol producido con una tonelada de biomasa residual. Se calculó como el producto del total de biobutanol producido en la biorrefinería y el poder calorífico del biobutanol como se muestra en la ecuación 39.

$$Y_e = BB_p * PC_{BB} \quad \dots \text{Ec. 39}$$

Donde:

Y _e	Rendimiento energético (MJ/t de biomasa residual).
BB _p	Biobutanol producido en la biorrefinería (kg/t de biomasa residual).
PC _{BB}	Poder calorífico del biobutanol (MJ/kg de biobutanol). Se tomó como poder calorífico un valor de 37 MJ/kg (National Center for Biotechnology information, 2018).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se determinaron los impactos ambientales medidos como huella de carbono (HC) y huella hídrica (HH) de la cadena de producción de biobutanol carburante a partir de biomasa residual de paja de trigo o rastrojos de maíz. En primer lugar, se presenta la HC y HH de la fase agrícola considerando el ciclo 2016 – 2017 a partir de datos en campo, y donde se realizó una asignación de impactos considerando la fracción másica y la fracción valor. A continuación, se muestran los resultados del cálculo de emisiones GEI del transporte de la biomasa residual a la biorrefinería. Posteriormente, se muestran los resultados de la HC y HH de la fase industrial donde se convierte la biomasa en biobutanol carburante. Finalmente, la integración de los resultados muestra la HC y HH expresados g y L por MJ de energía producida respectivamente.

7.1. RENDIMIENTO Y COMPOSICIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

Los datos de campo se obtuvieron con dos propósitos: determinar el rendimiento de biomasa lignocelulósica residual mediante el índice de residuos (IR) para las variedades y condiciones agroclimáticas prevalentes en los casos seleccionados y para obtener la composición en términos de azúcares.

El valor de IR varía de acuerdo a la variedad del cultivo, las prácticas agronómicas y las condiciones agroclimáticas. En México no se encontraron datos de IR consistentes para conocer la producción real de biomasa residual de cada caso de estudio, por lo que fue necesario determinar el IR para cada caso.

Los IR resultantes para olotes de maíz presentaron valores de 0.13 a 0.25 kg de biomasa residual seca/kg grano seco (Tabla 12). Mientras que el IR para el rastrojo de maíz fueron de 0.80 a 0.90 kg de biomasa residual seca/kg grano. Los IR determinados en campo para las variedades cultivadas en los tres casos de estudio fueron entre 30 al 40% menores en comparación a otras variedades de otros países reportadas por Valdez-Vazquez et al. (2010). Esto enfatiza la relevancia de realizar estudios en campo para determinar el valor del IR de las variedades cultivadas en México, y que han sido utilizado para estimar el volumen de generación de los residuos agrícolas.

Los rendimientos de biomasa residual calculados con los IR determinados en campo, presentaron un rendimiento 1.5 veces mayor para Guasave y Atotonilco que para Tenancingo. Estas diferencias se debieron principalmente a la altura de la planta, la densidad de siembra y los rendimientos de grano. De los tres casos de estudio para maíz y basado en el rendimiento de biomasa residual, Guasave fue el municipio con el mayor rendimiento de biomasa residual. A pesar de que Guasave no tuvo el mayor IR ni para olote ni para maíz, si presentó el mayor rendimiento de grano.

Tabla 12. Índice de residuo para olotes y rastrojo de maíz en los casos de estudio

Estado	Municipio	Variedad	Rendimiento de grano (t/ha)^a	IR olotes (kg/kg)^b	IR rastrojo (kg/kg)^b	Rendimiento de biomasa (t/ha)^c
Sinaloa	Guasave	DK-2038	12	0.13	0.80	11.16
Jalisco	Atotonilco el Alto	Asgrow	10	0.20	0.90	11.00
Estado de México	Tenancingo	H-52	7	0.25	0.80	7.35

^a Datos obtenidos por entrevistas con productores (ver sección 6.3.1.3); ^b kg de biomasa residual seca/kg grano producido; ^c incluye rastrojos y olotes.

Esto se debe a la densidad de cultivo, y por lo tanto, hace que el rendimiento de biomasa residual sea mayor. De esta forma, Guasave podría abastecer ampliamente los requerimientos de alimentación de nuevas biorrefinerías. Además, de acuerdo con Wang et al. (2015) mientras mayor sea el rendimiento de biomasa, se espera que sea menor la HC y HH, lo que significa menores impactos ambientales.

Por otro lado, los valores de IR para paja de trigo fueron 30% menores para las variedades cultivadas en los tres casos de estudio en México (Tabla 13), que para aquellas variedades extranjeras reportadas por Valdez-Vazquez et al. (2010). Al igual que para la biomasa residual de maíz, para la paja de trigo fue de gran importancia determinar el valor de IR en los casos de estudio para no sobreestimar la producción de biomasa residual.

Los rendimientos de biomasa residual calculados con los IR obtenidos en campo, oscilaron entre 6.50 a 7.15 t biomasa residual/ha. Mexicali y Pénjamo son los que presentan un rendimiento mayor que Cajeme. Esto se debe a la variedad sembrada y a la densidad de siembra. En cuanto a variedades sembradas en Mexicali y Pénjamo, Atil y Cortázar respectivamente, son trigos que presentan una mayor altura y follaje que la variedad Cirno 2008 sembrada en Cajeme (Figura 8) ((Sagarpa, 2011). En cuanto a la densidad de siembra, la FAO (2008), menciona que mientras más separadas se encuentran las plantas de trigo unas de otras, tienen mayor libertad para su desarrollo, por lo que el crecimiento de hojas y tallos es mayor, haciendo la producción de biomasa residual mayor.

De los tres casos de estudio para trigo y basándose en el rendimiento de biomasa residual, Mexicali tiene el mayor rendimiento de biomasa por hectárea, así como la mayor producción de grano anual. Por tanto, el municipio cumple ampliamente con la biomasa residual

requerida para abastecer nuevas biorrefinerías para producción de bioalcoholes. A pesar de que Pénjamo presenta los mismos rendimientos que Mexicali, este municipio no cumple por sí mismo con el abastecimiento diario requerido para nuevas biorrefinerías, lo que haría necesario transportar biomasa de otros municipios, lo que podría repercutir en mayores emisiones de GEI por transporte.

De las dos biomásas residuales, el trigo presentó un valor de IR 21% mayor que el maíz. Sin embargo, el maíz tiene mayores rendimientos de biomasa residual por ser una planta de mayor tamaño y contar con dos subproductos que pueden ser empleados, el olote y el rastrojo.

Tabla 13. Índice de residuo para paja de trigo en los casos de estudio

Estado	Municipio	Variedad	Rendimiento de grano (t/ha) ^a	IR paja (kg/kg) ^b	Rendimiento de biomasa (t/ha) ^c
Sonora	Cajeme	Cirno 2008	6.5	1.0	6.50
Baja California	Mexicali	Atil	6.5	1.1	7.15
Guanajuato	Pénjamo	Cortázar	6.5	1.1	7.15

^a Datos obtenidos de entrevistas a productores (ver sección 6.3.1.3); ^a kg de biomasa residual seca/kg grano producido; ^c t de biomasa residual seca/ha.



Figura 8. Variedades de trigo sembradas en Mexicali y Cajeme.

La composición de la biomasa residual es un factor clave que influye en la eficiencia de producción durante el proceso de conversión en biobutanol. El rendimiento de biobutanol a partir de biomasa residual está directamente relacionado con la concentración de celulosa, hemicelulosa y otros azúcares (Balat, 2011). Por lo anterior, una vez determinado el IR de la biomasa residual en los casos de estudio, se procedió a determinar los carbohidratos estructurales y lignina de las muestras obtenidas en campo. En la Tabla 14 se muestra la composición de la biomasa residual de cada caso de estudio. De la caracterización realizada a la paja de trigo de los casos de estudio, en promedio, el polisacárido más abundante fue la celulosa. El hecho de que la celulosa sea el polisacárido más abundante en la paja de trigo es un buen indicador ya que este polisacárido es la fuente de sustrato por los microorganismos para la producción del biobutanol. Por otro lado, de los tres casos de estudio de trigo y en base a la abundancia de celulosa presente en la paja, Mexicali es el municipio que presenta mayor cantidad, siendo 1.13 veces mayor que Cajeme y 1.44 veces mayor que Pénjamo.

Tabla 14. Composición de la biomasa residual de trigo y maíz (en %)

Caso de estudio	Biomasa	Extractivos	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas
Cajeme, Sonora	Paja de trigo	23.08	29.23	27.92	17.69	2.08
Mexicali, Baja California	Paja de trigo	20.15	33.04	21.76	22.56	2.50
Pénjamo, Guanajuato	Paja de trigo	23.66	22.90	34.89	14.50	4.05
Guasave, Sinaloa	Rastrojo de maíz	23.27	26.37	33.35	14.99	2.02
Atotonilco el Alto, Jalisco	Rastrojo de maíz	18.70	18.70	44.23	16.26	2.11
Tenancingo, Estado de México	Rastrojo de maíz	23.67	30.54	28.16	15.65	1.98
Guasave, Sinaloa	Olotas de maíz	9.99	29.96	49.02	10.89	0.15
Atotonilco el Alto, Jalisco	Olotas de maíz	11.50	27.43	56.11	4.87	0.09
Tenancingo, Estado de México	Olotas de maíz	9.91	29.73	53.04	7.21	0.12

*La metodología empleada para el cálculo de la composición de biomasa residual es la mencionada en la sección 6.3.1.2 de Sluiter et al. (2012).

En cuanto a la caracterización realizada al rastrojo y olotes de maíz de los casos de estudio, el polisacárido más abundante fue la hemicelulosa. Esto tendría como consecuencia, menores productividades en la biorrefinería, si sólo se destinará la celulosa a la producción del alcohol carburante. En los olotes por su parte, en promedio, la hemicelulosa también fue más abundante que la celulosa. Cabe destacar que aunque la abundancia de hemicelulosa en los rastrojos y olotes de maíz no es un mal indicador ya que también son azúcares fermentables para la producción de alcoholes, su presencia dificulta la eficiencia de la hidrólisis de la celulosa en glucosa, azúcar más fácilmente fermentable (Sun & Cheng, 2002). De los tres casos de estudio para maíz, el rastrojo de Tenancingo es el que presenta las mejores características para la producción de biobutanol, ya que es el que presenta la mayor concentración de celulosa en las diferentes partes de la planta.

De las biomásas residuales caracterizadas, en general la composición difiere a la reportada en bibliografía. Para paja de trigo, por ejemplo, el porcentaje de celulosa en las muestras caracterizadas fue menor al 37% de celulosa reportado por otros autores (Lawther *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 2012). No obstante, los porcentajes de hemicelulosa y lignina en la paja de trigo de las muestras si coincide con lo reportado por los autores. Por otro lado, para la paja y olotes de maíz se observó la misma tendencia, donde el porcentaje de celulosa en las muestras caracterizadas fue menor al 38% reportado por otros autores (Kaar & Holtzaple, 2000; Prinsen 2010). En paja y olotes de maíz el porcentaje de hemicelulosa en las muestras fue mayor al 22% reportado por Kaar & Holtzaple (2000). Estas variaciones en la composición se deben principalmente a las variedades, edad, condiciones de crecimiento, tales como clima, y las interacciones entre estos factores. Los estudios mencionados anteriormente son de países como China, lo que justifica las diferencias en la composición con respecto a las variedades mexicanas (Jorgensen, Kristensen, & Felby, 2012).

En general, con los datos obtenidos se encontró que la paja de trigo es la que presenta mayor contenido de celulosa, lo que significa que, aunque su rendimiento de biomasa sea menor, su rendimiento de producción de butanol será mayor.

7.2. LEVANTAMIENTO DE INVENTARIOS

En los municipios seleccionados por presentar la mayor disponibilidad de biomasa residual de trigo y maíz, se realizaron entrevistas semi-estructuradas a los productores de donde se obtuvieron datos acerca del manejo de los cultivos que posteriormente se usaron para completar los inventarios de las emisiones de gases efecto invernadero y consumo de agua que fueron empleados para el cálculo de la huella de carbono e hídrica de los casos de estudio seleccionados.

Los resultados de mayor interés fueron las características del cultivo, el tipo de siembra y manejos de residuos (Tabla 15), el uso y aplicación de fertilizantes y pesticidas (Tabla 16), el tipo de riego y volúmenes de agua empleados en el cultivo (Tabla 17) y finalmente el empleo de maquinaria y consumo de combustible (Tabla 18). A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada caso de estudio.

Tabla 15. Características del cultivo, tipo de siembra y manejo de residuos

Caso de estudio	Variedad de cultivo	Tamaño de parcela (ha)	Tipo de siembra	Manejo de residuos
Cajeme	Trigo (Cirno 2008)	10	Reducida	<ul style="list-style-type: none"> – 90% de los residuos se deja en campo. – 10% se emplea para alimentación de ganado.
Mexicali	Trigo (Atil)	10.3	Convencional	<ul style="list-style-type: none"> – Los residuos se queman en su totalidad.
Pénjamo	Trigo (Cortázar)	3	Convencional	<ul style="list-style-type: none"> – Los residuos se queman en su totalidad.
Guasave	Maíz (Dk-2038)	10	Reducida	<ul style="list-style-type: none"> – 70% de los residuos se deja en campo. – 30% se emplea para alimentación de ganado.
Atotonilco el Alto	Maíz (Asgrow)	10	Reducida	<ul style="list-style-type: none"> – 70% de los residuos se deja en campo. – 30% se emplea para alimentación de ganado.
Tenancingo	Maíz (H-52)	1	Reducida	<ul style="list-style-type: none"> – 90% de los residuos se deja en campo. – 10% se emplea para alimentación de ganado.

Tabla 16. Uso y aplicación de fertilizantes y pesticidas

Caso de estudio	Fertilizantes (kg/ha)		Pesticidas (L/ha)	
Cajeme	– Urea	300	Traxo	2L /3 ha
	– Fósforo	100		
	– Amonio	100		
Mexicali	– Urea	350	Axial	1
	– Fósforo	50		
	– Amonio	125		
Pénjamo	– Urea	850	Traxo	5
Guasave	– Urea	400	Quil	500
	– Amonio	230		
Atotonilco el Alto	– Urea	500	Controla	5
	– Sulfato	200		
	– Dap	200		
Tenancingo	– Urea	350	Quil	50
	– Fertilizante maicero	175		

Tabla 17. Tipo de riego y volúmenes de agua empleados en el cultivo

Caso de estudio	Tipo de Riego	Volumen de agua empleado (m³)
Cajeme	Riego con agua de presa	7.5 m ³
Mexicali	Riego con agua de presa	6.0 m ³
Pénjamo	Riego con agua de río	31 m ³
Guasave	Riego de agua de presa	42 m ³
Atotonilco el Alto	Temporal (riego con lluvia)	0
Tenancingo	Temporal (riego con lluvia)	0

Tabla 18. Empleo de maquinaria y consumo de combustible

Caso de estudio	Etapas del proceso	Maquinaria	Consumo de combustible (L/ha)	Número de veces que se realiza la actividad
Cajeme	Preparación de terreno	Tractor	10	4
	Siembra	Tractor	10	2
	Mantenimiento	Tractor	10	1
	Cosecha	Trilladora	20	2
Mexicali	Preparación de terreno	Tractor	14	2
	Siembra	Tractor	14	2
	Mantenimiento	Manual	0	0
	Cosecha	Trilladora	25	1
Pénjamo	Preparación de terreno	Tractor	15	4
	Siembra	Tractor	10	3
	Mantenimiento	Manual	10	2
	Cosecha	Trilladora	20	4
Guasave	Preparación de terreno	Tractor	15	3
	Siembra	Tractor	15	1
	Mantenimiento	Avioneta	40	1
	Cosecha	Trilladora	40	2
Atotonilco el Alto	Preparación de terreno	Tractor	15	4
	Siembra	Tractor	10	3
	Mantenimiento	Manual	10	2
	Cosecha	Trilladora	20	4
Tenancingo	Preparación de terreno	Tractor	4	3
	Siembra	Tractor	3	3
	Mantenimiento	Manual	3	2
	Cosecha	Trilladora	10	3

7.3. FASE AGRÍCOLA

Para esta fase del trabajo, se determinaron los impactos ambientales en la fase agrícola de la cadena de producción de biobutanol carburante 2G. En donde se seleccionaron los casos de estudio, se determinó el rendimiento de biomasa lignocelulósica residual en t/ha mediante datos en campo, asimismo se determinó el contenido de azúcares en la biomasa residual, se realizó el levantamiento de inventarios de GEI y consumo de agua, y se calculó la HC y HH para la etapa agrícola.

7.3.1. HUELLA DE CARBONO (HC)

La HC se calculó para conocer el impacto ambiental que tiene la fase agrícola en la cadena de producción de alcoholes, biobutanol en este caso. El cálculo se llevó a cabo con las ecuaciones reportadas por el IPCC (2006), modificadas por Ali et al. (2016). La HC se expresó en kg CO₂ eq/t de biomasa residual y se contabilizaron las emisiones directas e indirectas de fertilizantes nitrogenados y pesticidas, además de las emisiones de óxidos nitrosos por descomposición de residuos, las emisiones de la combustión de maquinaria agrícola y las emisiones por quema de residuos en cada etapa de la fase agrícola.

Para los dos escenarios propuestos para la fase agrícola, se contabilizaron las emisiones por hectárea de la preparación del terreno, la siembra, el mantenimiento y la cosecha. Las emisiones por hectárea de cada etapa se calcularon por separado con ayuda de los inventarios de emisiones y la metodología mencionada, obteniendo los resultados de la Figura 9.

De los dos escenarios planteados, el escenario convencional (escenario 1) presenta las mayores emisiones por hectárea en comparación con el escenario de producción de biobutanol (escenario 2). Esto se debe a que, en el escenario convencional, la biomasa residual se quema o se deja en campo para su descomposición en varios de los casos de estudio, mientras que en el escenario para la producción de biocombustibles en todos los casos de estudio sólo se deja el 30% de la biomasa en campo, y el resto se extrae. La implementación de la producción de biocombustibles podría reducir las emisiones de gases efecto invernadero de un 50% a un 90% en las actividades en campo, lo que equivale de 7,000 a 17,000 kg CO₂ eq/ha.

En el escenario convencional, la mayor contribución de CO₂ eq proviene de la etapa de siembra, en promedio un 60% del total de las emisiones, las cuales provienen principalmente de la descomposición de los residuos dejados en campo como biofertilizantes y de la aplicación de fertilizantes nitrogenados para el desarrollo de la planta. Otro de los mayores contribuidores de CO₂ eq es la etapa de cosecha, la cual produce en promedio el 35% del total de las emisiones principalmente a causa de la quema de los residuos para la limpieza de las parcelas.

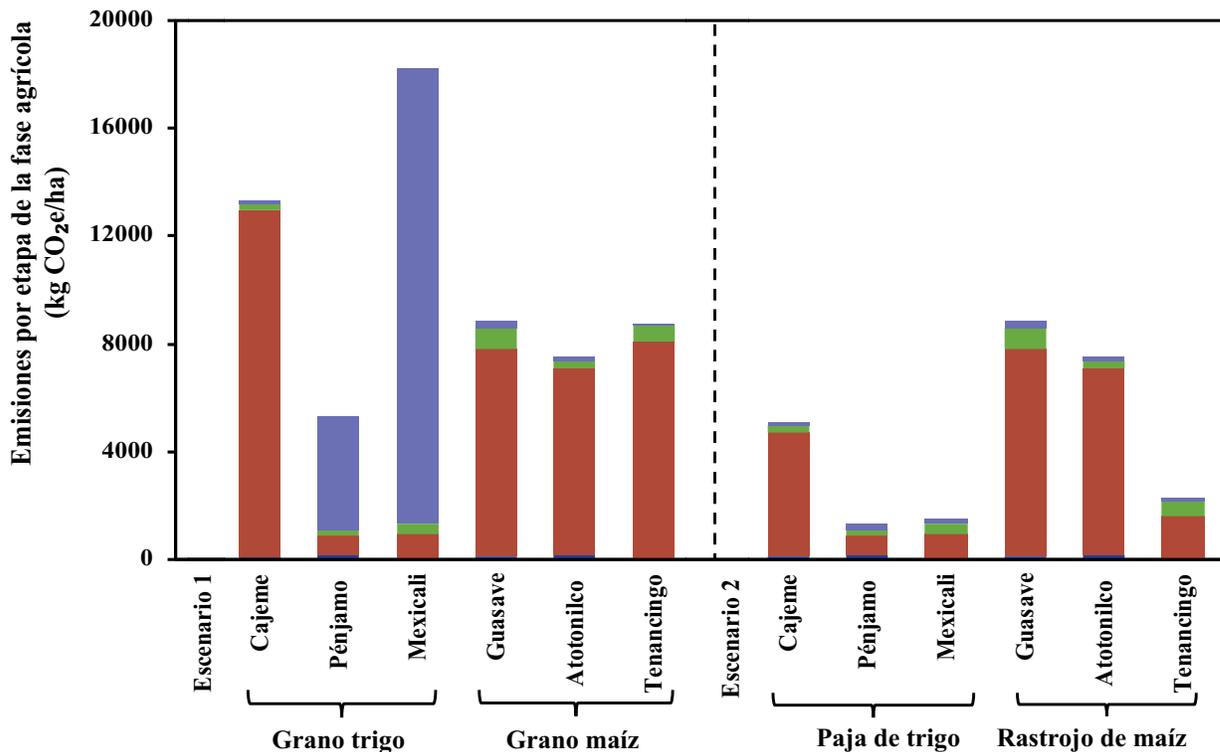


Figura 9. Emisiones GEI por etapa de la fase agrícola.

Las otras dos etapas, preparación del terreno y mantenimiento, sólo aportan entre el 1.2% al 3.91% del total de las emisiones debidas principalmente al uso de maquinaria agrícola.

De los seis casos de estudio en el escenario convencional, los casos de estudio para paja de trigo, presentan 30% más emisiones que los casos de estudio de rastrojo de maíz. Para trigo, el caso de estudio con mayores emisiones de CO₂ eq por hectárea es Mexicali, siendo la principal causa de las emisiones la quema de los residuos agrícolas. Pénjamo por su parte debe el 80% de sus emisiones a la quema de residuos al igual que Mexicali. Sin embargo, Mexicali presenta mayores emisiones que Pénjamo debido a una mayor densidad de plantación. Cajeme por su parte, no realiza quema de residuos, sin embargo, deja el 90% de los residuos en campo y su descomposición ocasiona el 85% de las emisiones de GEI. Para maíz, los tres casos de estudio presentan emisiones GEI muy cercanas entre sí.

En el escenario de producción de biocombustibles, las emisiones de CO₂ eq provienen principalmente de la etapa de siembra, representando el 84% del total de las emisiones, las cuales provienen principalmente de la descomposición de los residuos dejados en campo como biofertilizantes y la aplicación de fertilizantes nitrogenados. En este escenario, el

mantenimiento es el segundo contribuyente de emisiones de GEI debido al uso de combustibles fósiles, siendo responsable del 9% de las emisiones totales. La preparación del terreno y la cosecha contribuyen con un 3% y 4%, respectivamente. La etapa de cosecha presenta el menor impacto ya que se proyecta que en ninguno de los casos de estudio haya quema de residuos.

De los seis casos de estudio para el escenario de producción de biocombustibles, los casos de rastrojo de maíz presentan un impacto 36% mayor que los casos de paja de trigo. Para los casos de estudio de paja de trigo, Cajeme es el que presenta las mayores emisiones de CO₂ eq a la atmósfera. Para los escenarios de rastrojo de maíz por su parte, los casos de estudio en Guasave y Atotonilco presentan las mayores emisiones GEI. Cabe mencionar que estos dos casos de estudio no presentan una reducción en las emisiones GEI en comparación al escenario convencional, debido a que las prácticas agrícolas actuales ya consideran la extracción de los residuos en el mismo porcentaje al establecido en el escenario 2. En el caso de estudio en Tenancingo, el escenario 2 reduce el 74% de las emisiones GEI debido a una mayor extracción de los residuos, de una extracción del 10% en el escenario 1 a una extracción del 70% en el escenario 2.

Una vez contabilizadas las emisiones de CO₂ eq por hectárea e identificadas las etapas del proceso con mayor impacto, se obtuvo la HC para cada caso de estudio, en donde, las emisiones obtenidas por hectárea se dividieron entre el rendimiento de biomasa residual para obtener las emisiones de CO₂ eq por tonelada. Para la HC se tomaron de igual manera como base dos escenarios, el escenario convencional (escenario 1) y el escenario de producción biocombustibles (escenario 2), los resultados se muestran en la Figura 10 en donde de lado derecho se muestran las HC del escenario convencional sin asignación y del lado izquierdo se muestran las HC al implementar la biomasa residual como biocombustibles, además de la asignación de impactos.

Los valores de asignación empleados para la paja de trigo y rastrojo de maíz para cada caso de estudio se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Valores de asignación para trigo y maíz en los casos de estudio

Caso de estudio	Grano	Paja o rastrojo
Cajeme	0.88	0.12
Pénjamo	0.87	0.13
Mexicali	0.87	0.13
Guasave	0.90	0.10
Atotonilco	0.9	0.1
Tenancingo	0.91	0.9

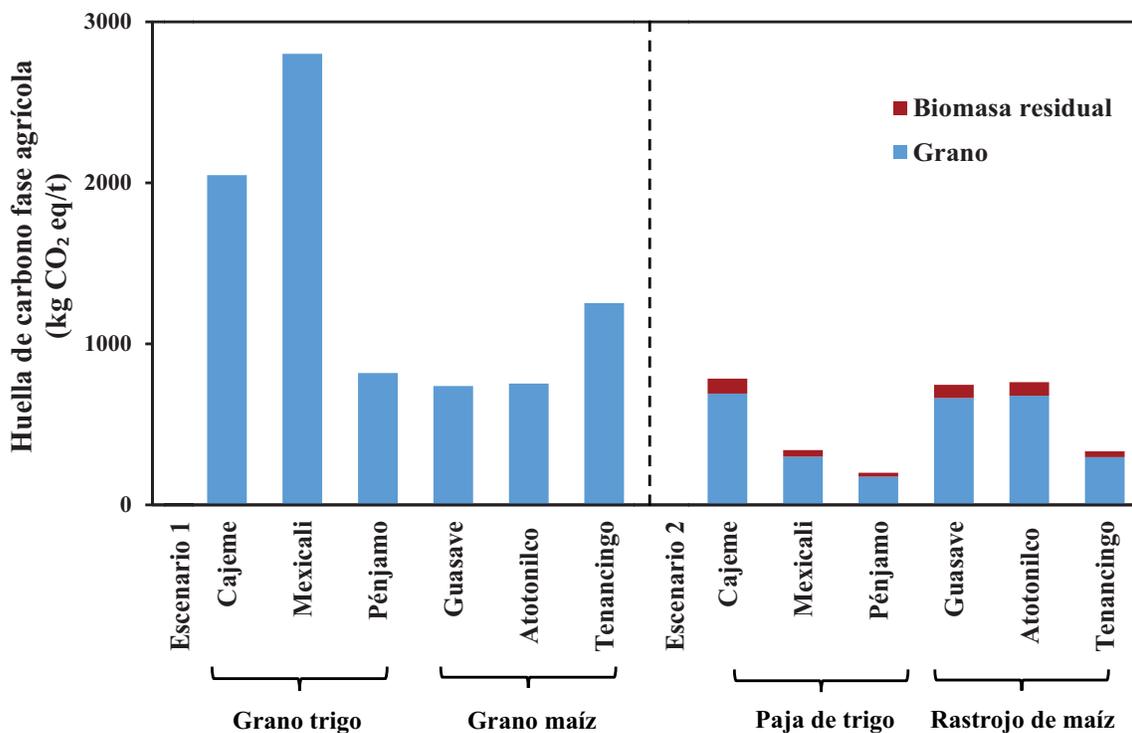


Figura 10. Huella de carbono de la fase agrícola.

De los dos escenarios planteados, el escenario convencional (escenario 1) presenta los mayores valores de huella de carbono en comparación con el escenario de producción de biocombustibles (escenario 2). La implementación de la producción de biocombustibles puede reducir en promedio, un 60% la huella de carbono en la fase agrícola.

En el escenario 1, el grano es el único producto por lo que el total de los impactos se le asigna a éste, expresando la huella de carbono como kg de CO₂ eq/t de grano. En este caso, el grano de trigo es el que presentó los mayores valores de huella de carbono, siendo la principal causa de las emisiones la quema de la biomasa residual para la limpieza del terreno y la descomposición de los residuos dejados en campo como fertilizantes. Para los casos de estudio de grano de trigo, se calculó una HC de 819 a 2,801 kg de CO₂ eq/t. Por su parte, los casos de estudio de grano de maíz presentaron valores de huella de carbono entre 738 a 1,253 kg de CO₂ eq/t. Los valores de HC para grano de trigo calculados para algunos de los casos de estudio fueron mayores a los reportados en literatura. Para grano de trigo se reportan valores de HC de 607 a 1,164 kg CO₂ eq/t (Fallahpour *et al.*, 2012; Lares-Orozco *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015;), mientras que la HC para grano de maíz se reporta de 236 a 400 kg CO₂ eq/t (Väisänen 2015; Xu & Lan, 2017). Las variaciones se deben principalmente a que en los casos de estudio de trigo analizados se emplea un mayor número de veces la maquinaria agrícola, se emplea una mayor concentración de fertilizantes nitrogenados, y los rendimientos de grano son menores. Además, en algunos de los estudios previamente

reportados no se tomaron en cuenta las emisiones por descomposición ni quema de residuos (Väisänen, 2015).

En el escenario 2, se estableció que el 70% de la biomasa residual sería extraída como materia prima para biorrefinerías, por tal motivo se asignó un valor (precio) a la biomasa residual y se realizó la asignación de impactos entre el grano y dicha biomasa. En este escenario, se obtuvieron los valores de la HC tanto del grano como de la biomasa residual. Los valores de HC para la paja de trigo y el rastrojo de maíz fueron en promedio, 60 CO₂ eq/t.

Cabe destacar que será importante tomar en cuenta la composición bromatológica de cada biomasa residual que influye directamente en los rendimientos de alcoholes (Balat, 2011). En este caso, la paja de trigo presentó mayores porcentajes de azúcares fermentables y que, aunque no presenta el mayor rendimiento de biomasa por hectárea, podría tener mayores productividades de biobutanol. Por tal motivo, la paja de trigo podría ser una mejor materia prima para las biorrefinerías que el rastrojo de maíz, lo que se analiza más adelante.

7.3.2. HUELLA HÍDRICA (HH)

La HH se calculó para identificar el impacto ambiental de la fase agrícola de la producción de biobutanol sobre la disponibilidad del recurso hídrico. El cálculo se llevo a cabo siguiendo la metodología de Scarpace et al. (2010) y se cuantificó el agua azul, verde y gris requeridas para el proceso. Primero, se realizó el cálculo del consumo de agua por hectárea, para conocer el tipo de agua con mayor volumen gastado en la fase agrícola. Posteriormente, se llevo a cabo el cálculo de la HH al dividir el consumo de agua por hectárea entre el rendimiento del cultivo.

Se calculó la evapotranspiración real del cultivo medido, ET_c, que representa el requerimiento de agua del cultivo. El valor de ET_c depende de las condiciones climáticas (como temperatura, humedad relativa, y radiación) que prevalecen en el ciclo agrícola en el cual se siembra el cultivo. De esta forma, se encontró que, para el cultivo de trigo, el cultivo en Cajeme presentó los mayores valores de ET_c debido a una mayor evapotranspiración de referencia a causa de la temperatura y porcentaje de humedad en el campo. Para el cultivo de maíz, Atotonilco y Tenancingo tuvieron los mayores valores de ET_c que Guasave debido que la temperatura fue mayor y los porcentajes de humedad sean menores afectando la evapotranspiración de referencia que esta directamente relacionada con el ET_c.

El agua verde se contabilizó como la precipitación efectiva correspondiente a los ciclos de cultivo para cada caso de estudio. Por otro lado, el agua azul se contabilizó como el agua empleada para el riego. Cabe mencionar que el agua de riego usada por los productores, solo se tomó en cuenta cuando el agua verde o precipitación efectiva fue menor a la evapotranspiración real del cultivo (ET_c). Para los seis casos de estudio se contabilizó el

consumo de agua verde, siendo mayor para los casos de estudio en Cajeme y Mexicali debido a que tuvieron la mayor precipitación promedio para los años en estudio de 99 mm y 139 mm, respectivamente. El consumo de agua azul (agua de riego), se presentó en todos los casos de estudio de trigo, pero únicamente en el caso de estudio de maíz en Guasave, ya que los casos de estudio en Atotonilco y Tenancingo son cultivo de temporal. El consumo de agua azul para el cultivo de trigo osciló de 950 a 3,504 m³/ha, mientras que para el caso de estudio de maíz fue de tan solo 129 m³/ha. El caso de estudio en Pénjamo presentó el mayor consumo de agua azul seguido de los casos de estudio en Mexicali, Guasave y Cajeme. Esto debido a la disponibilidad de agua de riego disponible en cada caso. Con ello, en Pénjamo, Mexicali y Guasave se logró cubrir entre el 80% al 90% de los requerimientos de agua del cultivo (ET_c). Para el resto de los casos de estudio, los cultivos se estuvieron bajo estrés hídrico. Por otro lado, el consumo de agua gris para los casos de estudio de trigo osciló de 60 a 77 m³/ha, mientras que para los casos de estudio de maíz se obtuvieron valores en un rango de 130 a 160 m³/ha. En suma, los tres casos de estudio de trigo presentaron un consumo de agua por hectárea 540% mayor que para los casos de estudio de maíz.

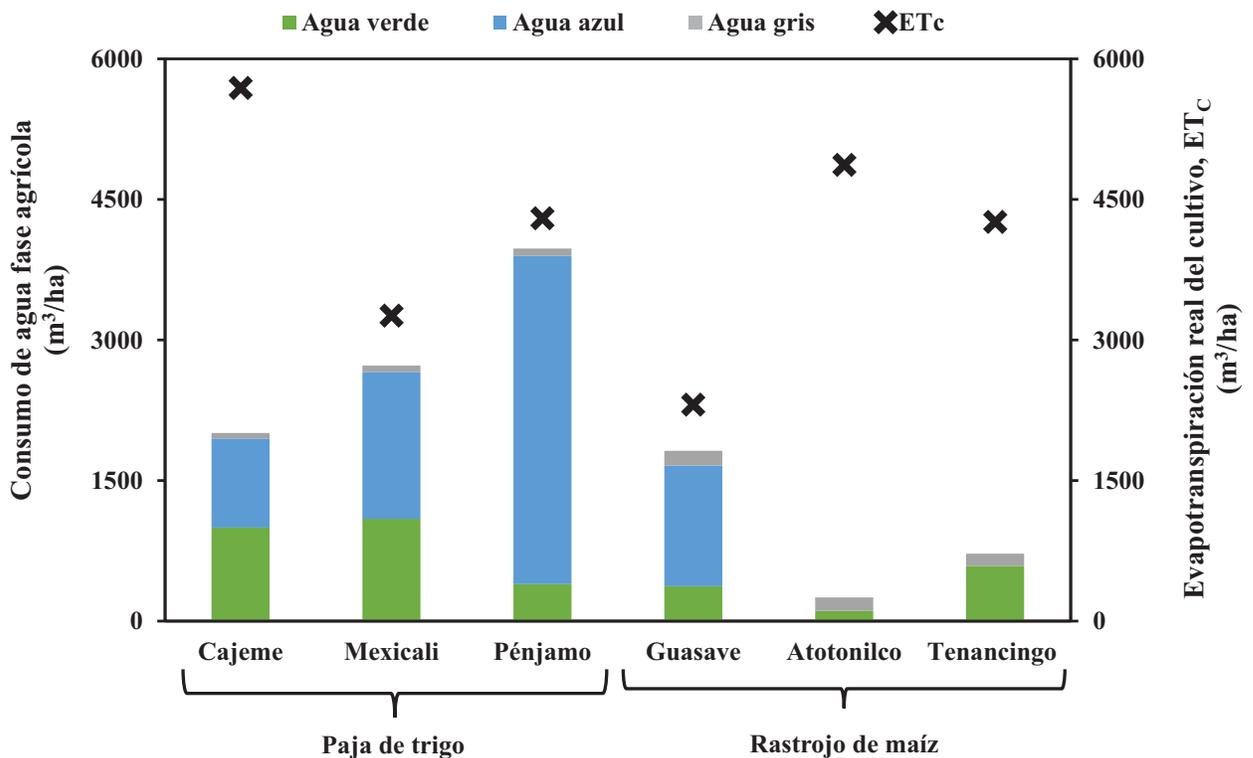


Figura 11. Evapotranspiración real del cultivo y consumo de agua en la fase agrícola.

Una vez identificado el consumo de agua por hectárea en las etapas de la fase agrícola y los tipos de agua empleados en cada una, se procedió a dividir el consumo de agua total entre el rendimiento de biomasa residual para obtener la HH de los casos de estudio (Figura 12). Para la HH se tomaron 2 escenarios: el escenario convencional (escenario 1) y el escenario de producción biocombustibles (escenario 2).

En el escenario convencional (escenario 1), el grano es el único producto por lo que el total de los impactos se le asigna a este, por lo que la HH se expresó en m³ de agua por t de grano. En este caso, el grano de trigo es el que presentó los mayores valores de huella hídrica, siendo las principales causas las condiciones fisiológicas del cultivo, las condiciones climáticas, y la precipitación efectiva. Para los casos de estudio de grano de trigo, se calculó una HH de 300 a 600 m³/ha. Por su parte, los casos de estudio de grano de maíz presentaron valores de HH de 25 a 150 m³/ha. Los valores de HH reportados por otros autores para el grano de trigo fueron mayores a los reportados en la literatura. Para grano de trigo se reportan valores de 1,117 a 2650 m³/t (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Ababaei & Ramezani Etedali, 2016). Mientras que, la HC para grano de maíz reporta valores de 1,222 y 2,388 m³/t (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Ababaei & Ramezani Etedali, 2016). Las variaciones se deben a las condiciones climáticas a las que se expone el cultivo, tales como temperatura y porcentaje de humedad, la precipitación pluvial y las evapotranspiraciones, los cuales varían de acuerdo a las condiciones del caso de estudio.

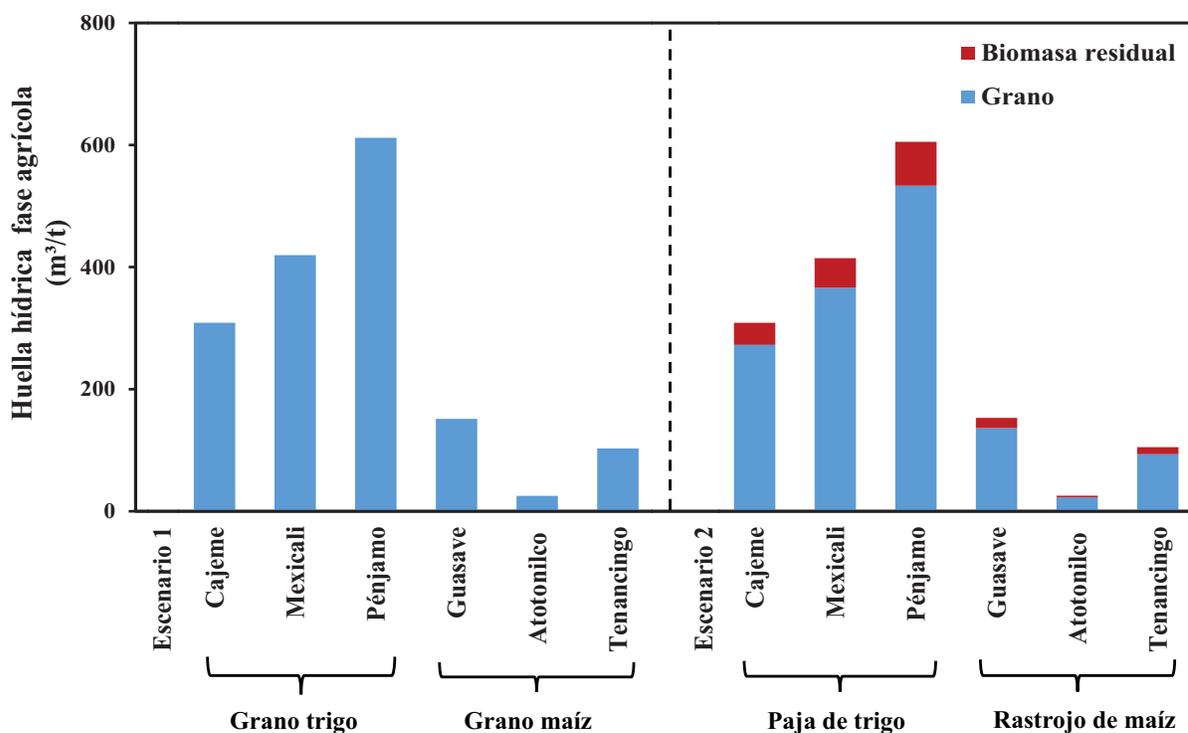


Figura 12. Huella Hídrica en la fase agrícola. En el lado derecho se muestra la HH del grano

El caso de estudio en Pénjamo presentó la mayor HH con un valor de 612 m³/t de trigo principalmente a causa de la irrigación que se realiza en el cultivo, ya que a pesar de que no presenta el mayor ETc, es el único cultivo que cumple su requerimiento en un 90% gracias al riego. Para los tres casos de estudio de maíz, la mayor HH fue para el caso de estudio en Guasave con un valor de 151 m³/t de grano, lo que se debió al uso de riego. Para el escenario de producción de biocombustibles (escenario 2), los productos con valor económico fueron el grano y la biomasa residual, esta última como materia prima para la biorrefinería. Por ello, se asignó un valor (precio) a la biomasa residual y se realizó la asignación de impactos entre el grano y la biomasa. En este escenario, se obtuvieron los valores de HC tanto del grano como de la biomasa residual. La HH total resultante para el escenario 2 fue la misma que para el escenario 1. Esto se debe a que las condiciones agroclimáticas como precipitación efectiva, evapotranspiración del cultivo, temperaturas, entre otras, se mantienen igual en ambos escenarios, por lo que los ETc no cambia lo que hace que el uso de agua sea el mismo. Sin embargo, al realizar la asignación, los valores de la HH para el grano se reducen alrededor del 15% para todos los casos. Mientras que la HH para la biomasa residual osciló entre 36 m³/t de biomasa a 72 m³/t de biomasa para los casos de estudio de trigo y entre 3 m³/t de biomasa a 17 m³/t de biomasa para los casos de estudio de maíz. Los valores de HH para paja de trigo y rastrojo de maíz calculados para algunos de los casos de estudio, fueron menores a los reportados en literatura.

La HH reportada para trigo fue de 140 m³/t de biomasa residual y para rastrojo de maíz de 205 m³/t de biomasa residual (Mathioudakis *et al.*, 2017). Las variaciones se deben a las diferencias en las condiciones climáticas y prácticas de campo que varían de caso a caso, o bien, por los valores considerados en la asignación de impactos (la fracción masa y la fracción valor).

En general, en la fase agrícola el trigo presentó un impacto 78% mayor sobre la disponibilidad del recurso hídrico en comparación con el maíz.

7.4. TRANSPORTE DE BIOMASA RESIDUAL

Una vez determinados los impactos ambientales ocasionados por la fase agrícola de la cadena de producción de biobutanol, se procedió a identificar los impactos del transporte de la biomasa residual del campo a la biorrefinería. Para el cálculo de las emisiones de CO₂ eq se consideró la distancia del campo a la planta, la capacidad de los camiones, los litros de combustible consumidos y sus factores de emisión. Se tomó como base camiones con una capacidad de carga de 13 toneladas que trasladarán un total de 1,000 toneladas de biomasa residual al día. Se determinaron las emisiones de CO₂ eq por transporte de biomasa para seis plantas de producción de biobutanol localizadas en: (1) Cajeme, Sonora; (2) Mexicali, Baja California; (3) Abasolo, Guanajuato; (4) Gabriel Leiva Solano, Sinaloa; (5) Atotonilco,

Jalisco; y (6) Acambay, Estado de México. Para las plantas ubicadas en Guanajuato y Estado de México fue necesario considerar el abastecimiento de biomasa de varios municipios para cumplir la alimentación de 1,000 t/d (ver Tabla 8 en sección 6.3.2).

La Figura 13 muestra el total de emisiones de CO₂ eq por transporte de biomasa para cada planta. Las emisiones de CO₂ eq solo fueron dependientes de la distancia a la que se transporta la biomasa residual del campo a la planta. Para las plantas alimentadas con paja de trigo ubicadas en Cajeme y Mexicali la distancia fue de tan solo 10 km, dando como resultado la menor cantidad de emisiones de CO₂ eq por tonelada de biomasa transportada. Las plantas ubicadas en Pénjamo y Tenancingo se abastecen con más de cinco municipios, que en promedio tienen una distancia de 69 km y 28 km, respectivamente lo que incrementó las emisiones por tonelada de biomasa transportada. Para las plantas alimentadas con rastrojos de maíz ubicadas en Gabriel Leiva Solano y Atotonilco las distancias fueron de 22 km y 15 km, respectivamente.

En este trabajo, las emisiones de CO₂ eq por transporte de biomasa oscilaron de 76 a 208 kg de CO₂ eq/t de biomasa transportada considerando solo la variable de distancia recorrida. Las emisiones de CO₂ eq por transporte también dependen del tipo de camión usado y su capacidad de carga (Wiloso *et al.*, 2012) factores que fueron considerados fijos en este trabajo.

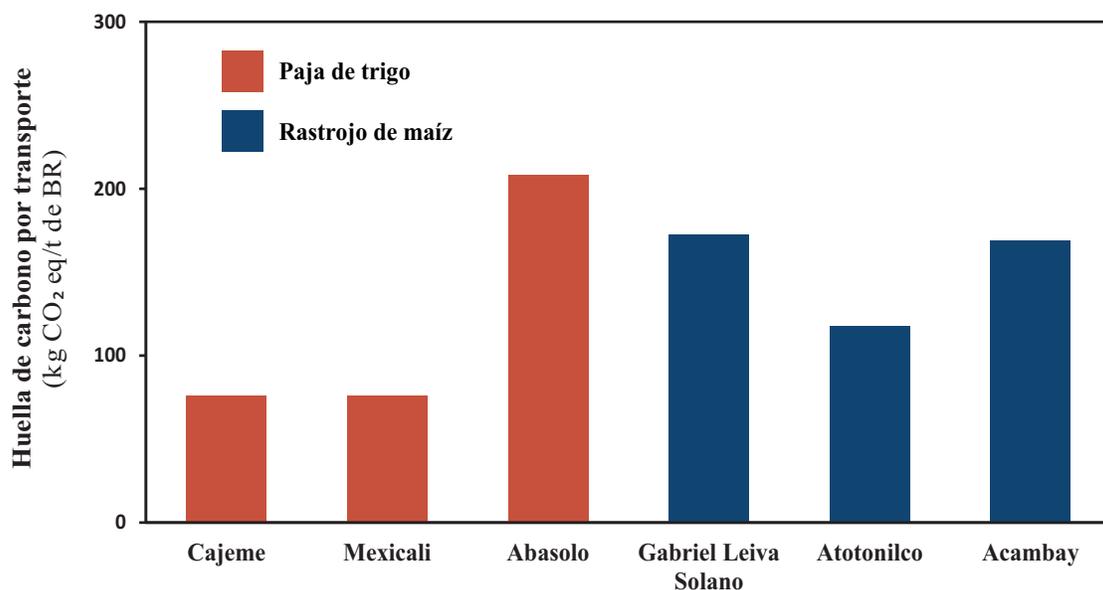


Figura 13. Huella de carbono por tonelada de biomasa transportada.

Se han reportado valores de HC por transporte de biomasa a la planta. Por ejemplo, Luo et al. (2009) presentaron una HC por transporte de rastrojo de maíz con aproximadamente 50 kg de CO₂ eq/t, siendo menor a la calculada en este trabajo. Esto se debió a la capacidad de carga de camión ya que fue de 32 t que es 2.4 veces mayor que la capacidad de los camiones usados en este trabajo. La distancia recorrida esta dentro de los rangos empleados en este trabajo con un valor de 20 km.

7.5. FASE INDUSTRIAL

A continuación, se procedió a determinar los impactos ambientales de la fase industrial medidos como HC y HH. La biorrefinería propuesta para producción de butanol presenta una alimentación diaria de 1,000 t de biomasa residual al día y cuenta con un proceso basado en una hidratación, tres bioprocesos basados en cultivos mixtos, la destilación y la cogeneración (Sanchez, *et al.*, 2017; Valdez-Vazquez & Sanchez, 2018;). Los valores de HC y HH para las seis biorrefinerías se obtuvieron adaptando los resultados del modelo de simulación publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) quienes utilizaron el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA).

De las dos biomásas analizadas, la paja de trigo presentó un rendimiento 11% mayor de butanol que los rastrojos de maíz (Figura 14). En las biorrefinerías se consideró que toda la celulosa presente en la biomasa residual es convertida en butanol. Por lo que, el rendimiento de butanol fue proporcional a la cantidad de celulosa presente en la biomasa.

Para paja de trigo, el rendimiento de butanol obtenido en la simulación dio como resultado valores que van de 77 a 112 kg/t. De los tres casos de estudio, la paja de trigo de Mexicali presentó el mayor rendimiento de 112 kg/t de paja. Lo anterior debido a su mayor porcentaje de celulosa, lo que se traduce en mayor rendimiento. Previamente se ha reportado un rendimiento de butanol a partir de paja de trigo de 193 kg/t (Cao *et al.*, 2016), que en promedio es 50% mayor en comparación con los rendimientos obtenidos en este trabajo. La diferencia se debe principalmente a un mayor porcentaje de celulosa en la biomasa, que como se discutió en la sección 7.1, en literatura el porcentaje de celulosa es consistentemente mayor al encontrado en las muestras recolectadas en los casos de estudio. Para el rastrojo de maíz, se obtuvieron rendimientos de butanol de 60 a 106 kg/t de rastrojo. Tenancingo presentó el mayor rendimiento con un valor de 106 kg/t de rastrojo. Lo anterior debido a su mayor porcentaje de celulosa lo que se traduce en mayor rendimiento. Cao et al. (2016) presentó rendimientos de butanol de rastrojo de maíz de 138 kg/t rastrojo, que es en promedio 37% mayor a lo obtenido en este trabajo. La diferencia se debe principalmente a un mayor porcentaje de celulosa en la biomasa, como se explico anteriormente.

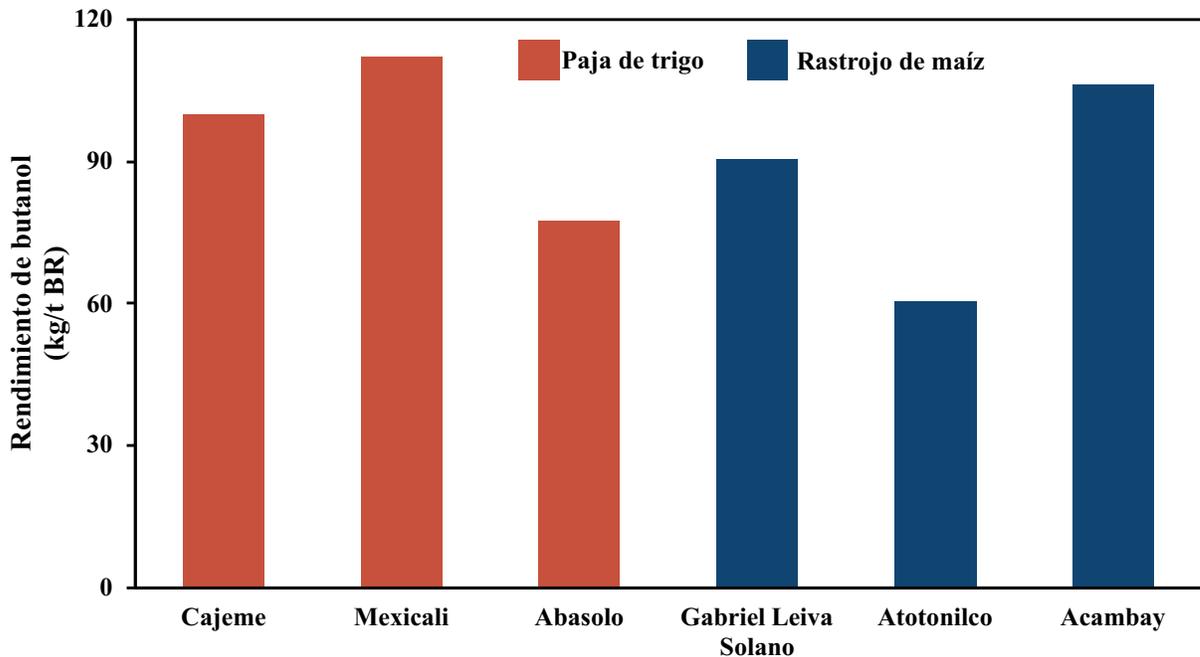


Figura 14. Rendimiento de biobutanol en biorrefinerías alimentadas con paja de trigo y rastrojos de maíz.

7.5.1. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO (HC)

La HC de la fase industrial medida como kg CO₂ eq/t de biomasa procesada se determinó adaptando los resultados publicados por Valdez-Vazquez & Sanchez (2018) para un modelo de simulación de transformación de la materia prima a butanol con el software SuperPro Designer v 9.0 (Intelligen, Inc., USA). Para este caso, el software fue alimentado con la composición bromatológica de la biomasa residual de cada caso de estudio, y posteriormente se establecieron las mismas condiciones de operación y finalmente se contabilizaron las emisiones de CO₂ eq producto de: el reactor de hidrógeno (fermentación), el reactor ABE, el reactor de la digestión anaerobia y la cogeneración. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Figura 15.

Los valores de la HC fueron muy similares entre tipo de biomasa y entre biorrefinerías. No obstante, si se observó que la etapa de cogeneración contribuyó con más del 70% de las emisiones de CO₂ eq, mientras que los tres bioprocesos tuvieron emisiones de CO₂ eq cercanas entre sí. La etapa de cogeneración tuvo la mayor contribución de emisiones debido a la quema del metano generado en el digester anaerobio, así como la lignina residual, proceso para la producción de electricidad.

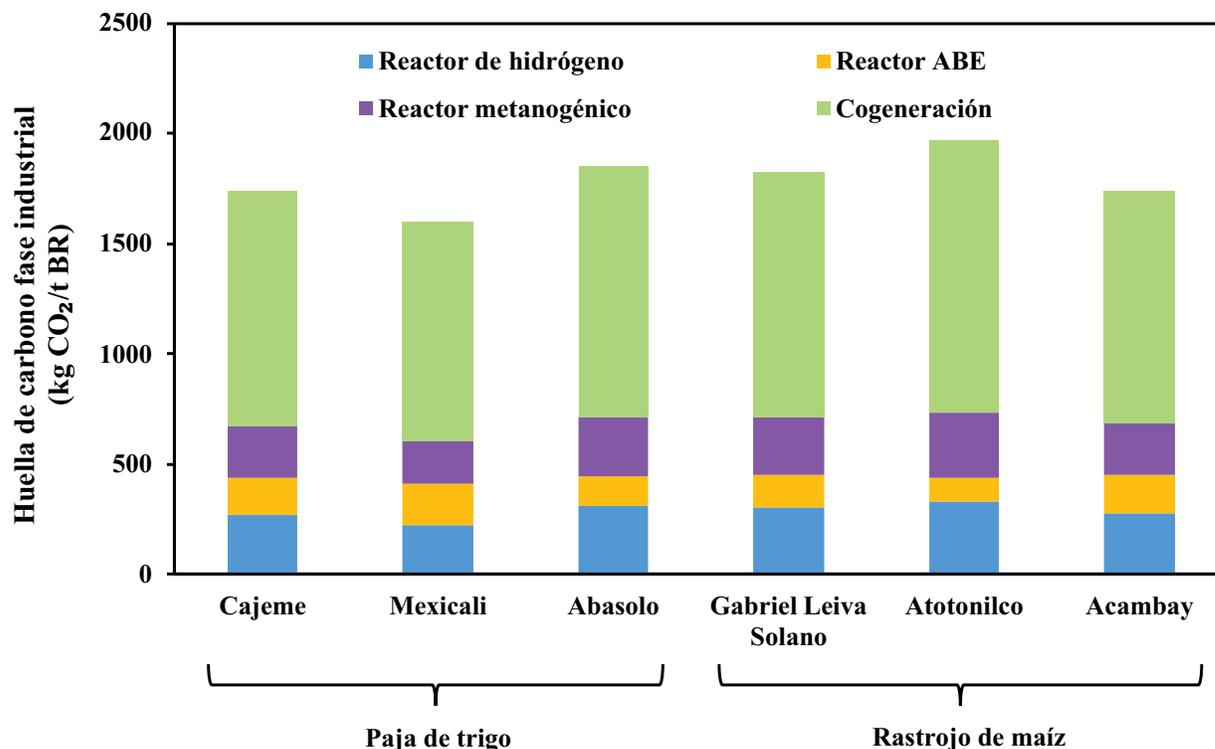


Figura 15. Huella de carbono por tonelada de biomasa procesada de biorrefinerías alimentadas con paja de trigo y rastrojos de maíz.

Para las seis biorrefinerías simuladas, los valores de la HC de la fase industrial tomaron valores que van de 1,598 a 1,967 kg de CO₂ eq/t. La HC tuvo una variación máxima del 20% entre biorrefinerías debido a que el proceso de producción de biobutanol tuvo las mismas condiciones de operación. Esta variación en los valores de la HC se debe a la variación en el contenido de celulosa, donde a menor contenido de celulosa la HC fue mayor (Figura 16). En general, los resultados obtenidos indican que las emisiones de CO₂ eq en la fase industrial dependen más de la etapa del proceso que del tipo de biomasa procesada.

7.5.2. CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA

Al igual que la HC, la HH se calculó con los resultados publicados para un modelo de simulación de producción de butanol (Valdez-Vazquez & Sanchez 2018), y con ello conocer el impacto a la disponibilidad del recurso hídrico que presenta la fase de transformación de la materia prima a butanol (fase industrial). El consumo de agua contabilizada en esta fase, fueron las entradas de agua superficial a: el reactor de hidratación, el reactor (ABE), la

generación de vapor y la generación de agua residual de la destilación (vinazas). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 16. Al igual que en el caso de la HC, los valores resultantes para la HH fueron muy similares entre tipo de biomasa y biorrefinería. Sin embargo, se notó que la etapa de hidratación (reactor de hidratación) contribuyó con más de 40% del consumo de agua, seguido del reactor ABE y la generación de vapor. La etapa de hidratación tuvo el mayor consumo de agua, debido a las necesidades de agua para alcanzar la concentración de sólidos totales establecida para este bioproceso.

Para las seis biorrefinerías simuladas, los valores de HH de la fase industrial tomaron un valor promedio de 14 m³/t de biomasa residual. La HH tiene una variación máxima del 10% entre biorrefinerías debido a que el proceso de producción de biobutanol tiene las mismas condiciones de operación. En general, los resultados obtenidos indican que el consumo de agua dulce en la fase industrial depende más de la etapa del proceso que del tipo de biomasa procesada.

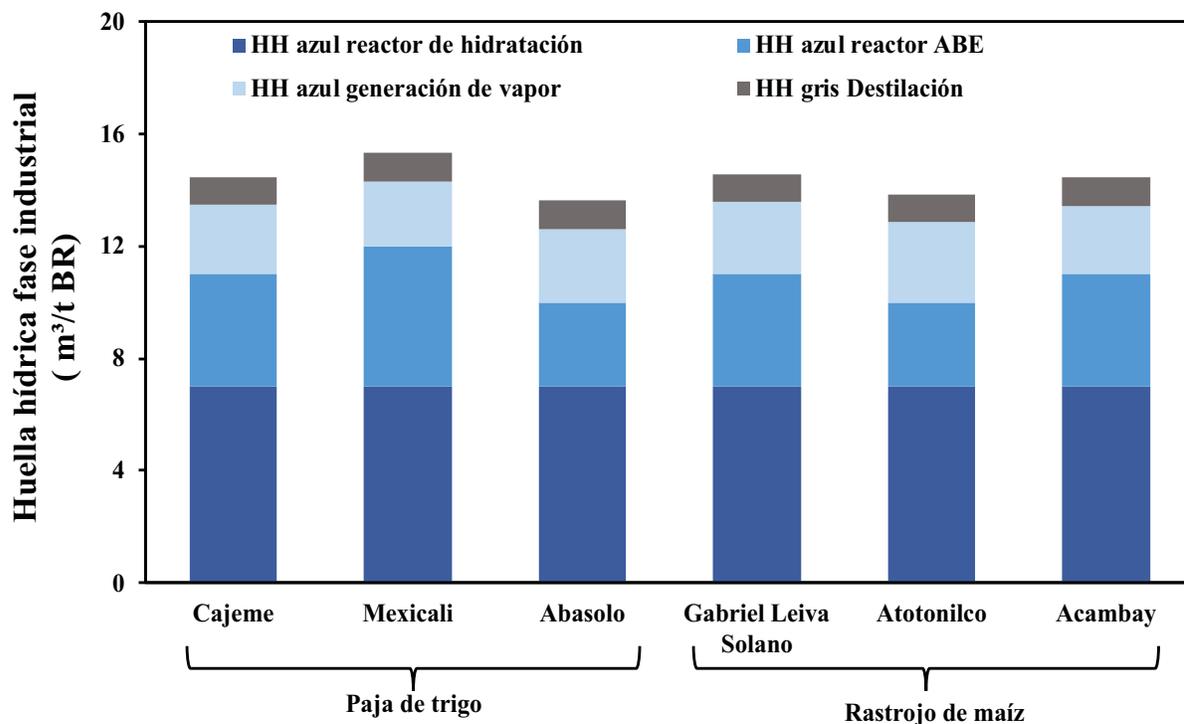


Figura 16. Huella hídrica por tonelada de biomasa procesada en la fase industrial.

7.6. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS DE LA CADENA DE PRODUCCIÓN DE BUTANOL

Una vez calculados los valores de HC y HH de las tres fases: agrícola, transporte e industrial, se procedió a realizar la integración de los resultados para obtener la HC y HH global por unidad de energía (biobutanol), y poder así conocer sus impactos ambientales de manera total.

7.6.1. HUELLA DE CARBONO GLOBAL

Para identificar el impacto ambiental de la cadena de producción de biobutanol, se realizó la suma de las emisiones de CO₂ equivalente de las tres fases de la cadena de producción de butanol. A su vez, se realizó también la comparación de las emisiones de CO₂ equivalente por fase del proceso, para conocer la etapa que presenta el mayor impacto e identificar las distintas áreas de oportunidad de las diferentes operaciones unitarias.

De las tres distintas fases de la cadena de producción de butanol, en general, para las dos biomásas residuales analizadas, la fase industrial contribuyó con el 90% del total de las emisiones de CO₂ equivalente (Figura 17). Esto principalmente debido al proceso de cogeneración. Al igual que en este trabajo, Väisänen et al. (2016) comparó las emisiones de CO₂ en las distintas fases de la producción de biobutanol, y reportó que la fase industrial contribuía con el 64% principalmente por la cogeneración para producción de energía y seguida de la fase agrícola con el 27%. Por otro lado, Papong et al. (2017) mencionó que en el proceso de producción de butanol, la fase industrial es responsable del 80% de las emisiones GEI. Esto a causa del uso de combustibles fósiles para la generación de vapor y energía. Sanchez et al. (2014) no menciona que fase del proceso es la que presenta mayor emisión de CO₂ eq pero muestra que en una biorrefinería propuesta para la producción de butanol, la etapa de producción de hidrógeno genera una importante cantidad de CO₂ eq, sin embargo, la etapa de cogeneración es la que mayor contribución de CO₂ eq tuvo al proceso.

El interés global de reducir el uso de combustibles fósiles esta emparejado con la necesidad de encontrar y evaluar alternativas sustentables para el sector autotransporte. El butanol es el único biocombustible que puede emplearse en mezclas con la gasolina sin necesidad de realizar modificaciones al motor, siendo una alternativa viable para la disminución de emisiones GEI. Sin embargo, es necesario el comparar la HC del bioalcohol con la de la gasolina para verificar si tiene un menor impacto. Para poder realizar la comparación, se expresó la HC como kg CO₂/MJ de butanol. Los resultados obtenidos para esta fase se muestran en la Figura 18.

En general, de los dos tipos de biomasa residual utilizados, el rastrojo de maíz presentó 22% más emisiones de CO₂ eq por MJ que la paja de trigo. Para las plantas alimentadas con paja de trigo, la planta ubicada en Abasolo presentó una HC 35% mayor que las plantas de Cajeme y Mexicali. Por otro lado, de las plantas alimentadas con rastrojo de maíz, Atotonilco fue la que tuvo la mayor HC, con una variación promedio de las otras dos plantas del 40%. La principal causa de las variaciones entre los valores de HC para la paja de trigo y el rastrojo de maíz es el rendimiento de butanol obtenido en la biorrefinería, ya que como se puede ver en la figura 19, mientras mayor es el rendimiento butanol, menores son las HC.

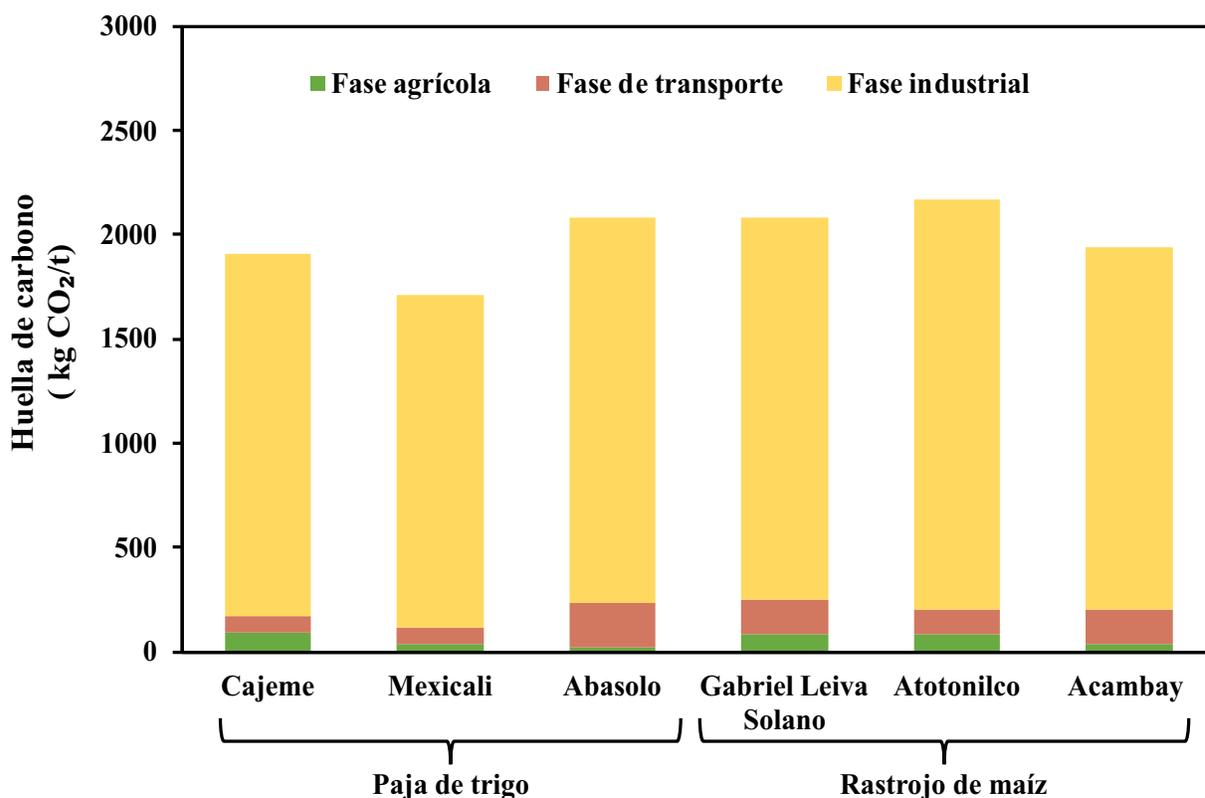


Figura 17. Huella de carbono por tonelada de biomasa residual en la fase agrícola, transporte e industrial de la cadena de producción de biobutanol, tomando únicamente los valores obtenidos con la asignación de impactos correspondientes.

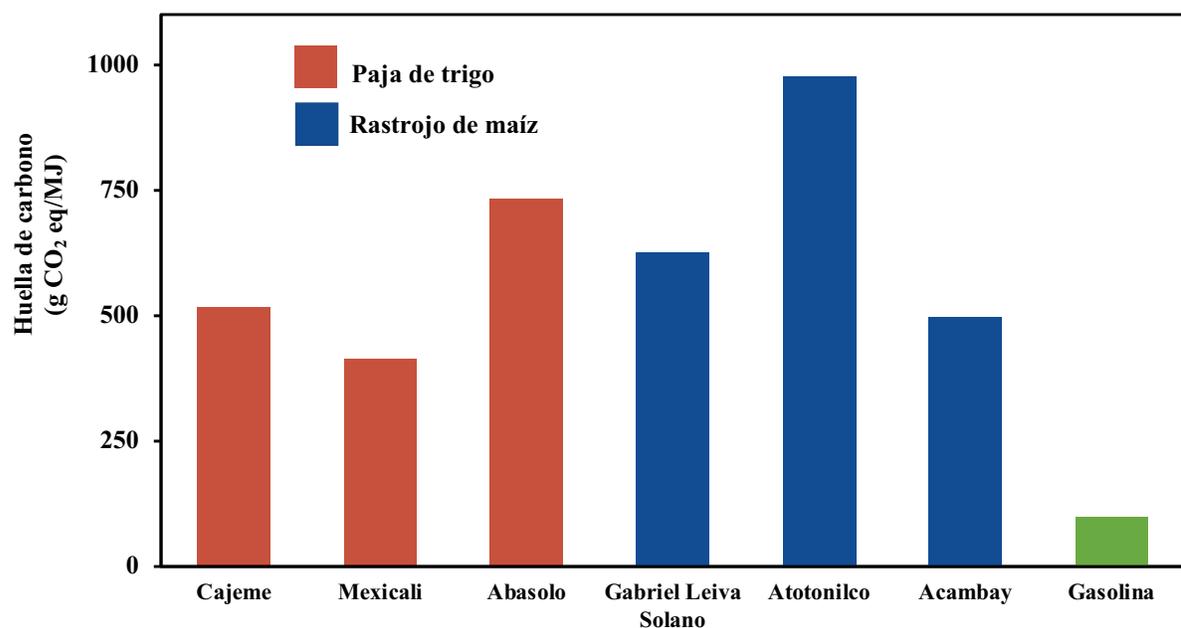


Figura 18. Huella de carbono por MJ de butanol.

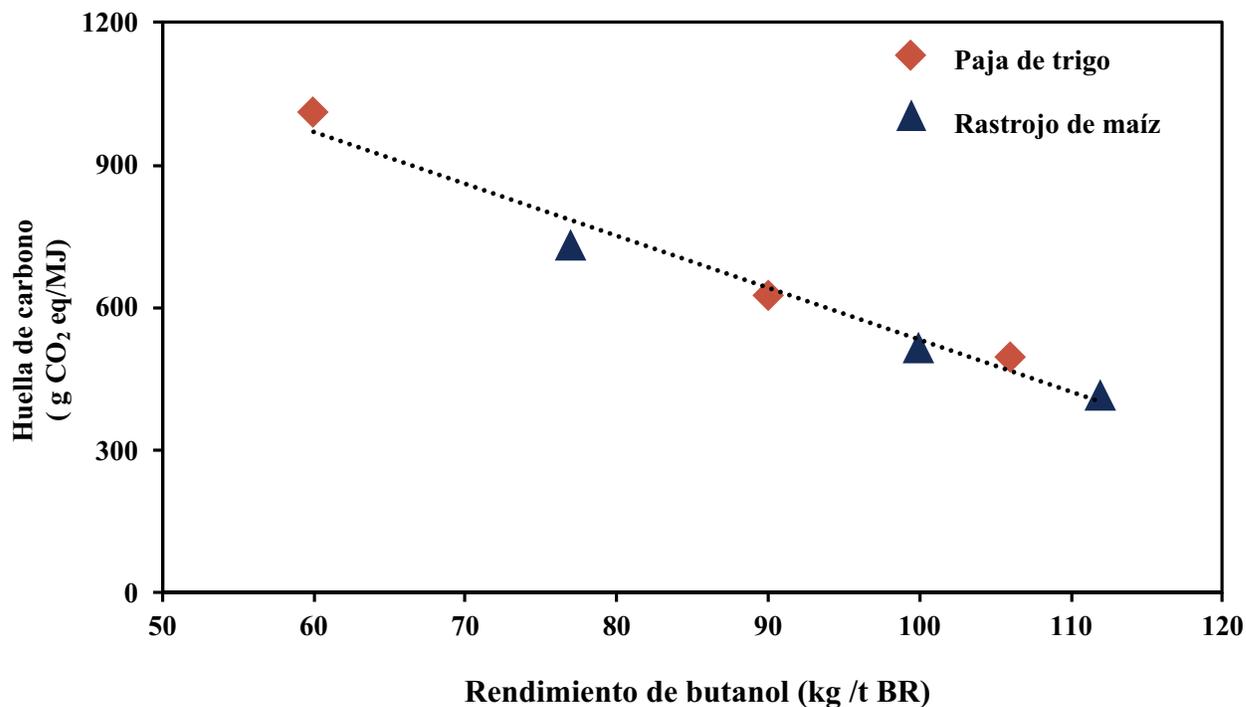


Figura 19. Relación entre rendimiento de butanol y huella de carbono.

Diversos autores han reportado valores de HC para la producción del biobutanol. Väisänen et al. (2016) calculó un valor de HC para la producción de butanol de 122g CO₂ eq/MJ utilizando como materia prima el rastrojo de maíz. El valor de la HC obtenido en este trabajo es mayor al de la referencia, debido principalmente a que en ella no se lleva a cabo la cogeneración para la obtención de energía. Por otro lado Papong et al. (2017) y Liu et al. (2017) presentaron valores de HC de 26 y 66 g CO₂ eq/MJ, respectivamente. Las materias primas empleadas fueron melaza de caña y tapioca, lo que hizo que los valores de HC obtenidos fueran menores, ya que al tener mayor concentración de glucosa que la paja de trigo, los rendimientos de butanol son mayores y los valores de HC disminuyen. En la tabla 20 se puede observar que los límites del sistema de los trabajos con los que se realiza una comparación, no son los mismos, sin embargo, se emplearon para tener una base de como para tener una idea de la situación actual y ver los puntos de mejora a tomar en cuenta para próximos trabajos.

Tabla 20. Comparación de metodologías y límites del sistema de trabajos previos

Metodología	Unidad Funcional	Materia prima	Límites del sistema	Referencia
-Análisis de ciclo de vida basado en ISO 14044 LCA standards. -Empleo del programa GaBi 5.0	1 MJ de butanol	Paja de maíz	De la cuna a la tumba (desde la producción de insumos hasta la distribución del butanol)	Väisänen et al. (2016)
-Análisis de ciclo de vida. -Empleo de software SimaPro 8.0 software.	1 GJ de etanol	Melazas obtenidas del proceso de producción de azúcar	De la cuna a la tumba.	Papong et al. (2017)
-Análisis de ciclo de vida.	1 MJ de etanol	Tapioca	De la cuna a la tumba (Sin tomar en cuenta la producción de insumos).	Liu et al. (2017)

Por otro lado, la HC de la producción de la gasolina toma un valor de 93 g CO₂ eq/MJ (Vargas-Ramirez *et al.*, 2017) siendo en promedio 84% menor que los valores de HC obtenidos al usar paja de trigo y rastrojos de maíz como materia prima para la producción de butanol. En general lo anterior se debe a las diferencias del proceso en donde los rendimientos de la gasolina son mayores que los del butanol, haciendo los valores de HC más pequeños.

En la fase industrial que es en donde se presentó la mayor cantidad de emisiones de CO₂ eq, se pueden implementar tecnologías para captura del CO₂, tales como la absorción química. Esta consiste en separar el CO₂ de un flujo de gases. La base de este proceso es la reacción de una base alcalina, normalmente aminas, en medio acuoso con un gas ácido. Se emplean torres de absorción cuyo tamaño es ya determinado por el caudal de solvente. Se pueden conseguir recuperaciones típicas de un 80 a un 95% (Cascón & Lupión, 2012). Otra tecnología prometedora es la captura biológica del CO₂ a través del uso de microalgas, las cuales a través de sus procesos de fotosíntesis hacen lo suficientemente eficiente la fijación de CO₂ de la atmosfera y de efluentes de gases de combustión industriales. Las microalgas pueden crecer en reactores abiertos o sistemas cerrados (fotobiorreactores). Estos últimos vienen en diferentes configuraciones: de columnas verticales (columnas de burbujas o elevación de aire) reactores tabulares y reactores de placa plana, Siendo los reactores de elevación por aire los que tienen potencial un gran potencial para los procesos industriales. Cabe mencionar que la eficiencia de captura de CO₂ por microalgas puede variar de la fisiología del alga, temperatura y química del reactor. Las eficiencias de fijación de CO₂ están por arriba del 80 al 99% bajo condiciones optimas de del 74% en condiciones ambientales, con tiempo de residencia del gas corto de 2 segundos (Keffer & Kleinheinz, 2002).

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que, al implementar las tecnologías antes mencionadas, las HC del butanol disminuirían aproximadamente un 80%, tomando valores finales de 110 g CO₂ eq/MJ para trigo y de 139 g CO₂ eq/MJ para maíz.

7.6.2. HUELLA HÍDRICA GLOBAL

Para identificar el impacto sobre la producción de butanol en la disponibilidad del recurso hídrico, se llevo a cabo el cálculo de los valores de HH de la fase agrícola e industrial y se realizó una suma para obtener la HH del proceso. Se realizó también, la identificación de las etapas de presentaron el mayor consumo de agua para ver sus áreas de oportunidad.

De la paja de trigo y el rastrojo de maíz, la paja de trigo presentó un consumo de agua 65% mayor que el rastrojo de maíz. La fase agrícola fue la responsable del mayor consumo de agua, siendo este 4.3 veces mayor que el de la fase industrial (Figura 20). Esto debido principalmente a los requerimientos de agua de la planta y los sistemas de riego ineficientes, además de las condiciones climáticas que se relacionan, tales como precipitación.

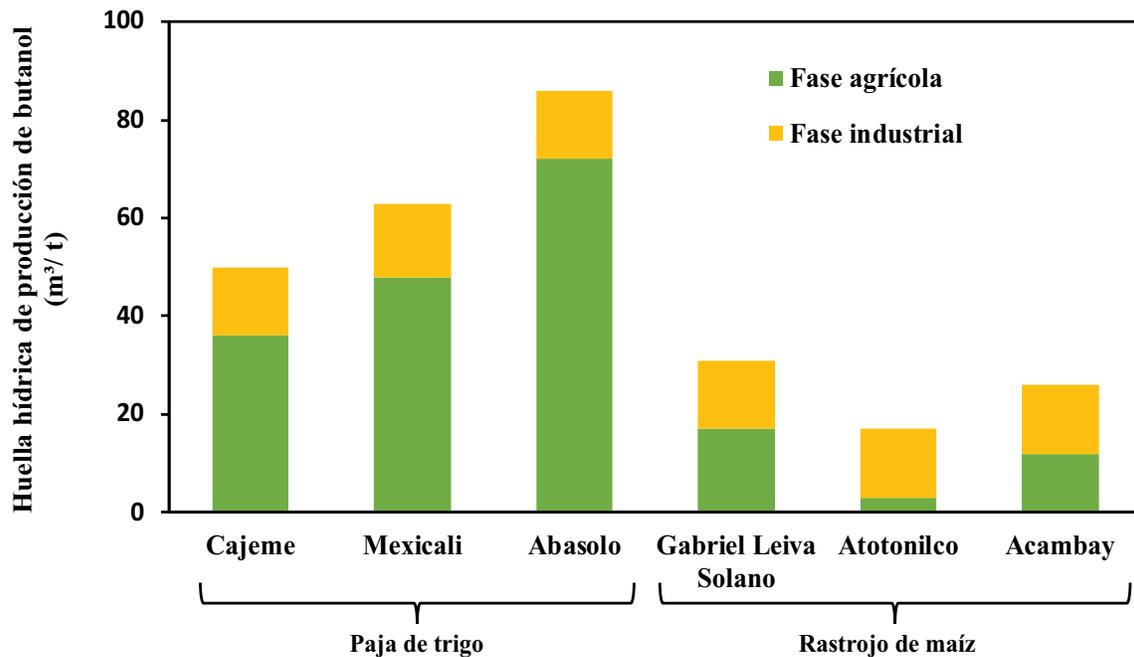


Figura 20. Huella hídrica por tonelada de biomasa por fase de la cadena de producción de biobutanol.

En la fase industrial por otro lado, las entradas de agua son mínimas y muchas de estas es recirculada en el proceso. Por otro lado, de las plantas alimentadas con rastrojos de maíz la planta ubicada en Atotonilco, fue la única que presentó mayor consumo de agua en la fase industrial que en la fase agrícola, siendo el consumo 1.1 veces mayor. Esto debido a que, en este caso de estudio en particular, no se lleva acabo riego del cultivo, lo que disminuye considerablemente la HH por tonelada de la fase agrícola.

Debido a que el butanol será implementado como combustible en mezclas con gasolina dentro del sector transporte, fue necesario cambiar la unidad funcional a L de agua/ MJ y así poder comparar el impacto ambiental sobre la disponibilidad del recurso hídrico del butanol y la gasolina. Los resultados fueron los que se muestran en la figura 21.

En general, de los dos tipos de biomasa residual empleados, la paja de trigo presentó el mayor consumo de agua teniendo un valor de HH 63% mayor que el rastrojo de maíz. Esto debido principalmente a la fase agrícola por el riego y requerimiento de agua del cultivo.

De las plantas alimentadas con paja de trigo, Abasolo fue la que presentó el mayor valor de HH por MJ, siendo 1.9 veces mayor que Mexicali y 2.2 veces mayor que Cajeme. Esto debido a que en la fase agrícola (caso de estudio Pénjamo) el requerimiento de agua de la planta

(ETc) fue más alto debido a las condiciones climáticas presentes en el ciclo de cultivo, por lo que se tomó toda el agua regada, alcanzando a cumplir el ETc casi en su totalidad, cosa que en los otros casos no sucede. Por otro lado, en la fase industrial, presentó el menor rendimiento de butanol, lo que hizo que los valores de la HH de la fase industrial también fueran mayores que en las otras plantas. Por otro lado, las plantas alimentadas con rastrojo de maíz, tuvieron valores de HH muy similares entre si con valores de 6 a 9 m³/MJ. La HH tuvo una variación máxima entre las tres plantas del 28% debido principalmente a la fase agrícola que se ve influenciada por los requerimientos de agua del cultivo (ETc) y las condiciones agroclimáticas del lugar.

Algunos autores han reportado valores de HH de la producción de alcoholes, sin embargo estas son en general mayores a las reportadas en este trabajo. Por ejemplo, (W. Gerbens-Leenes et al., (2009) presentó HH con valores de 211 L/MJ para trigo y 110 L/MJ para maíz. Por otro lado, Papong et al., (2017) reportó un valor de HH para las melazas de caña de 78 L/MJ. Cabe mencionar que en general las diferencias se deben a las condiciones climáticas, pero también a que en este trabajo las HH son de trigo, del maíz y las melazas y no se realiza una asignación de impactos, y que si se realizara el consumo de agua se reduce hasta en un 50%.

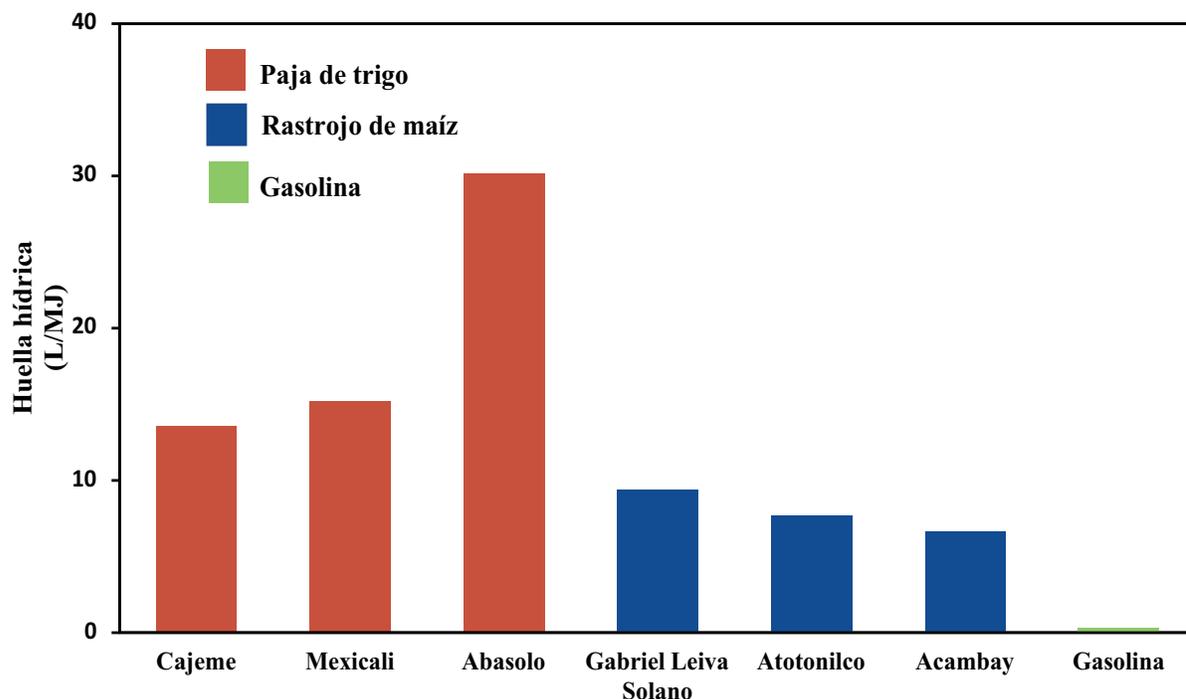


Figura 21. Huella hídrica por MJ de butanol de la cadena de producción de biobutanol.

La HH de la producción de la gasolina presentó valores de HH de 0.17 l/MJ a 0.21 l/MJ (Wu, *et al.*, 2009; Papong *et al.*, 2017) que son valores menores a los obtenidos en este trabajo. Cabe destacar que las diferencias en los valores de HH se deben principalmente a que en la producción de biobutanol se presenta la fase agrícola, siendo esta la fase en donde se lleva a cabo el mayor consumo de agua por el uso de agua verde y azul para cumplir con los requerimientos de agua del cultivo. Por otro lado en la cadena de producción de la gasolina no se presenta la fase agrícola, lo que hace que el consumo de agua sea menor. Sin embargo se pueden emplear alternativas como los sistemas de riego por goteo para disminuir aproximadamente un 50% del consumo de agua, además de poder mejorar prácticas agrícolas tales como horas de riego para un mayor aprovechamiento de agua que ayude a hacer menor el consumo y obtener menores HH (Jägermeyr *et al.*, 2015). A pesar de que con las alternativas planteadas no se alcance a tener valores de HH menores a los de la gasolina, si se presentarían reducciones significativas en los valores de HH de la producción del butanol.

En la cadena de producción de biobutanol, la paja de trigo emitió menor cantidad de CO₂ eq por MJ de biobutanol producido que el maíz, sin embargo, ocurre lo opuesto con respecto al recurso hídrico, ya que el rastrojo de maíz fue el que presentó el menor consumo de agua por MJ de butanol.

En general, la cadena de producción de butanol presentó mayores impactos ambientales medidos como HC y HH que la cadena de producción de la gasolina. Sin embargo, al tomar en cuenta la implementación de tecnologías que contribuyan al secuestro de CO₂ y la disminución en el consumo de agua en el proceso, los impactos pueden disminuir haciendo al biobutanol un biocombustible viable pero aun teniendo mayores impactos ambientales que la gasolina.

8. CONCLUSIONES

De la fase agrícola para la producción de biomasa lignocelulósica de trigo y maíz:

- De las dos biomásas residuales propuestas a utilizarse como materia prima para la alimentación de las biorrefinerías, el rastrojo de maíz presentó un rendimiento de biomasa 26% mayor que la paja de trigo.
- La paja de trigo presentó un impacto 78% mayor sobre la disponibilidad del recurso hídrico en comparación con el rastrojo de maíz.
- El rastrojo de maíz presentó una producción de emisiones de CO₂ eq 36% mayor en comparación con la paja de trigo.
- La implementación de la producción de biocombustibles podría reducir las emisiones de gases efecto invernadero de un 50% a un 90% en las actividades en campo lo que equivale de 7,000 a 17,000 kg CO₂ eq/ha. Debido principalmente a que el 70% de los residuos serán recolectados disminuyendo las emisiones por descomposición.

De la fase de transporte de la biomasa del campo a la industria:

- Las emisiones por transporte de biomasa residual oscilaron de 76 a 208 kg de CO₂ eq/t de biomasa transportada ya que las distancias del campo a las biorrefinerías planteadas era variable de acuerdo a cada caso, además que la capacidad de carga y modelo del camión se consideraron fijos para este trabajo.
- De la fase industrial para transformación de biomasa en butanol carburante:
- La paja de trigo presentó un rendimiento 11% mayor de butanol que los rastrojos de maíz, debido a su mayor porcentaje de celulosa lo que se traduce en mayor rendimiento de producción de butanol.
- Los valores de la HC de la fase industrial tomaron valores que van de 1,598 a 1,967 kg de CO₂ eq/t con una variación máxima del 20% entre biorrefinería, en donde las emisiones de CO₂ eq en la fase industrial dependen más de la etapa del proceso que del tipo de biomasa procesada, siendo la generación de electricidad la que presentó mayores emisiones.
- La HH de la fase industrial tuvo un valor promedio de 14 m³/t de biomasa residual con una variación máxima del 10% entre biorrefinerías, en donde el consumo de agua depende más de las etapas del proceso que del tipo de biomasa. Al tratarse de una biorrefinería de plataforma bioquímica, el consumo de agua dulce fue mayor en los bioprocesos que en las operaciones de generación de vapor siendo la hidratación

(reactor de hidratación) la etapa del proceso que contribuyó con más de 40% del consumo de agua.

De la cadena de producción de butanol:

- De las tres distintas fases de la cadena de producción de butanol, la fase industrial contribuyó con el 90% del total de las emisiones de CO₂ eq en donde la generación de electricidad fue la etapa con mayor generación de emisiones.
- El rastrojo de maíz presentó 22% más emisiones de CO₂ eq por MJ que la paja de trigo y se comprobó que a mayores rendimientos de butanol, los valores de HC fueron menores.
- La paja de trigo presentó una huella hídrica 65% mayor que el rastrojo de maíz, siendo la fase agrícola la responsable del mayor consumo de agua, el cual fue 4.3 veces mayor que el de la fase industrial.
- El biobutanol por plataforma bioquímica, no reduce el impacto medido como huella de carbono o huella hídrica en comparación con la gasolina.
- Los esquemas de biorrefinería de producción del alcohol (butanol) de segunda generación que utilizan materia prima lignocelulósica con mayor rendimiento por hectárea no presentó un menor impacto ambiental medido como huella de carbono y huella hídrica que aquella materia prima con menor rendimiento por hectárea, ya que se identificó que la HC y HH esta en mayor relación a la concentración de azúcares presente en la biomasa.

9. REFERENCIAS

- Ababaei, B., & Ramezani Etedali, H. (2016). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*, 179, 401–411.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016>
- Abengoa Bioenergy, 2006, Utilización del bioetanol
<http://www.abengoabioenergy.com/research/index.cfm?page=9&lang=2>
- Ali, S. A., Tedone, L., Verdini, L., & De Mastro, G. (2016). Effect of different crop management systems on rainfed durum wheat greenhouse gas emissions and carbon footprint under Mediterranean conditions. *Journal of Cleaner Production*, 140, 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.135>
- Altuna, A., Intia, L., Hierro, O., Unamunzaga, O., Neiker, B., & Ucan, F. D. (2012). Huella de carbono de los cereales, 1–10.
- Álvarez, C. (2014, October). ¿Qué significa el cambio climático? *Teoremaambiental*, (6), 33–53.
- Andrade, H. J., Campo, O., & Segura, M. (2014). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia / Carbon footprint of the rice (*Oryza sativa*) production system in the municipality of Campoalegre, Huila, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria VO - 15*, 15(1), 25. Retrieved from
<http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S0122.87062014000100004&lang=es&site=eds-live>
- Aylott, M., Higson, A., Evans, G., Hamer, A., & Mortimer, N. (2011). What is the most appropriate LCA method for measuring greenhouse gas emissions from bioenergy? *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 122–124. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Bautista, P., Hernandez, N., & Perez, P. (2008). Calidad de cosecha de trigo en Mexico.
- Cao, G., Sheng, Y., Zhang, L., Song, J., Cong, H., & Zhang, J. (2016). Bioremediation & Biodegradation Biobutanol Production from Lignocellulosic Biomass : Prospective and Challenges, 7(4). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000363>
- Cascón, L., & Lupión, M. (2012). *ESTUDIO DE LA COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO2 EN OXICOMBUSTIÓN*. Universidad de Sevilla.
- Casolani, N., Pattara, C., & Liberatore, L. (2016). Water and Carbon footprint perspective in Italian durum wheat production. *Land Use Policy*, 58, 394–402.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.014>
- Chiu, C. C., Shiang, W. J., Lin, C. J., Wang, C. H., & Chang, D. M. (2015). Water footprint analysis of second-generation bioethanol in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 101(1000), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.068>
- Conyngam, S., Orr, S., Llerena, C. A., Mariluz, J. P., León-melgar, P., Duss, J., ... Ana, A. (n.d.). Sector agropecuario ÍNDICE.
- Čuček, L., Klemeš, J. J., & Kravanja, Z. (2015). Overview of environmental footprints. In *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability* (pp. 131–193). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00005-1>

- De la Cruz, J. L., & Chao, M. (2011). Manual de cálculo y reducción de huella de carbono en el sector hotelero, 70.
- Díaz, M. (2013). CO₂ y el impuesto verde, saber dar y saber recibir. *Teoremaambiental*. (pp. 10-15). Año 19.
- DOF 06-06-2012. (2012). Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de La Federación*, pp. 1–44. Retrieved from file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican Government/Mexican Law on Climate Change 2012_lgcc.pdf
- Eisentraut, A. (2010). Sustainable Production of Second- generation Biofuels -. *IEA Energy Papers*, 1–39. <https://doi.org/10.1787/9789264084247-en>
- Fallahpour, F., Aminghafouri, A., Ghalegolab Behbahani, A., & Bannayan, M. (2012). The environmental impact assessment of wheat and barley production by using life cycle assessment (LCA) methodology. *Environment, Development and Sustainability*, 14(6), 979–992. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9367-3>
- FAO. (2008). *The state of food and agriculture, 2008*. Food and Agriculture Organization of United States.
- FIRA. (2015). Panorama Agroalimentario. *Dirección de Evaluación y Evaluación Económica y Sectorial*, 0–39. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61947/Panorama_Agroalimentario_Az_car_2015.pdf
- Fischer, G., Hizznyik, E., Prieler, S., Shah, M., & Velthuizen. (2007). BIOFUELS and FOOD SECURITY.
- García-Camús, J. M., & García-Laborda, J. Á. (n.d.). b i o c a r b u r a n t e s líquidos: biodiésel y bioetanol.
- García, A. (2011). *Estado del Arte de la*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3556.2321>
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Meer, T. H. Van Der. (2008). The water footprint of bio-energy: Global Water Use for Bio-Ethanol, Bio-Diesel, Heat and Electricity. *Value of Water Research Report Series*, 34(34), 108.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., & van der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10219–10223. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812619106>
- German, L., Schoneveld, G., Skutch, M., Andriani, R., Obidzinski, K., Komarudin, P. P. H., ... Norwana, a a B. D. (2010). The local social and environmental impacts of biofuel feedstock expansion A synthesis of case studies from Asia , Africa and Latin America. *Cifor*, (34), 12. Retrieved from www.cifor.cgiar.org
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J., & Panichelli, L. (2009). Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*, 100(21), 4919–4930. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.067>
- González, M. (2009). La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. *Divulgacion*, 2, 143–151.
- Herrera, N. (2015, December). Ecosistemas, un panorama oscuro del planeta. *Teoremaambiental*, 50.
- Hoekstra and P.Q. Hung. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade
- IPCC. (2006). Emisiones de N₂O de los suelos gestionados Y Emisiones De CO₂ derivadas de la aplicación de cal y uera. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 1–56.

- INECC. (2007). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html>
- Infoagro. (2017). El cultivo del trigo. Gobierno del estado de Baja California
- Jaegermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M., & Lucht, W. (2015). Water savings potentials of irrigation systems: Global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7), 3073–3091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>
- Jorgensen, H., Kristensen, J., & Felby, C. (2012). Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Kaar, W. E., & Holtzapfle, M. T. (2000). Using lime pretreatment to facilitate the enzymic hydrolysis of corn stover. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 189–199. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00091-4)
- Keffer, J. E., & Kleinheinz, G. T. (2002). Use of *Chlorella vulgaris* for CO₂ mitigation in a photobioreactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29(5), 275–280. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000313>
- Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 30(7), 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>
- Lares-Orozco, M. F., Robles-Morúa, A., Yopez, E. A., & Handler, R. M. (2015). Global warming potential of intensive wheat production in the Yaqui Valley, Mexico: A resource for the design of localized mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 127, 522–532. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.128>
- Lawther, J. M., Sun, R., & Banks, W. B. (1995). Extraction, Fractionation, and Characterization of Structural Polysaccharides from Wheat Straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(3), 667–675. <https://doi.org/10.1021/jf00051a021>
- Liska, A. J., Yang, H. S., Bremer, V. R., Klopfenstein, T. J., Walters, D. T., Erickson, G. E., & Cassman, K. G. (2009). Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, 13(1), 58–74. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00105.x>
- Liu, B., Wang, F., Zhang, B., & Bi, J. (2013). Energy balance and GHG emissions of cassava-based fuel ethanol using different planting modes in China. *Energy Policy*, 56, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.052>
- Liu, C., Cutforth, H., Chai, Q., Gan, Y., Liu, C., Cutforth, H., ... Gan, Y. (2017). Farming tactics to reduce the carbon footprint of crop cultivation in semiarid areas . A review To cite this version : HAL Id : hal-01636692 Farming tactics to reduce the carbon footprint of crop cultivation in semiarid areas . A review. *Agronomy for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0404-8>
- Luo, L., Van Der Voet, E., Huppel, G., & Udo De Haes, H. A. (2009). Allocation issues in LCA methodology: A case study of corn stover-based fuel ethanol. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(6), 529–539. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0112-6>
- Manzini, F., & Macías, P. (2004). *Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (Análisis y propuesta)*.
- Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., ... Cecott, L. (2011). LA BIOENERGÍA EN MÉXICO Situación actual y perspectivas de Bioenergía. *Cuaderno Temático Sobre La Bioenergía*, 4, 44.

- Mathioudakis, V., Gerbens-Leenes, P. W., Van der Meer, T. H., & Hoekstra, A. Y. (2017). The water footprint of second-generation bioenergy: A comparison of biomass feedstocks and conversion techniques. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.032>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Montesillo-Cedillo, J. L. (2016). Rendimiento por hectárea del maíz grano en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa*, 398, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.04.005>
- National Center for biotechnology information. (2018). <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1-butanol>.
- Orduña-Serrano, B., Olguín-Arreola, M. R., Escamilla-Alvarado, C., Valdez-Vazquez, I., 2018. ubicación de potenciales biorrefinerías de bioetanol a partir de residuos del maíz usando el método de centro de gravedad. XII Congreso regional para Norteamérica y el Caribe, Asociación mexicana de ingeniería, ciencia y gestión ambiental A.C. 18-20 octubre, Villahermosa, Tabasco.
- Papong, S., Rewlay-ngoen, C., Itsubo, N., & Malakul, P. (2017). Environmental life cycle assessment and social impacts of bioethanol production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 157, 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.122>
- Prinsen, P. (2010). Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas.
- Quintero, J. A., Rincón, L. E., & Cardona, C. A. (2011). Production of bioethanol from agroindustrial residues as feedstocks. *Biofuels*, 251–285. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00011-5>
- RAENG. (2017). *Sustainability of liquid biofuels*. Royal Academy of Engineering. Retrieved from www.raeng.org.uk/biofuels
- Rajchenberg-Ceceña, E. (2009). Producción Microbiológica de Butanol. *BioTecnología*, 13(3), 26–37. Retrieved from http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Butanol.pdf
- Renderos, R. (2016). Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar, (July 2014).
- Rosillo-Calle, F., 2012. More on heating values and moisture contents of biomass. In: The Biomass Assessment Handbook. Earthscan, London, UK, p. 253.
- Sacramento, J., Navarro, F., & Morales, L. (2017). Recomendaciones para realizar el análisis de ciclo de vida de la bioenergía en México, 52(999), 1–61.
- Sagarpa. (2011). Descripción de las Variedades de Trigo para el Valle de Mexicali, B.C. y Norte de Sonora. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Para Productores*, 18(18), 1–28.
- Sampeiro, J. I., & Mart, A. (2010). Bioenergía, 30–39. https://doi.org/http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/Bioenergia.pdf
- Sanchez, A., Magaña, G., Gomez, D., & Solís, M. (2014). Bidimensional sustainability analysis of lignocellulosic ethanol production processes. Method and case study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Sanchez, A., Valdez-Vazquez, I., Soto, A., Sánchez, S., & Tavarez, D. (2017). Lignocellulosic n-butanol co-production in an advanced biorefinery using mixed cultures. *Biomass and Bioenergy*, 102, 1–12.

- <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.023>
- Scarpore, F. V., Hernandes, T. A. D., Ruiz-Corrêa, S. T., Kolln, O. T., Gava, G. J. D. C., Dos Santos, L. N. S., & Victoria, R. L. (2016). Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 4576–4584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>
- Scholten, W. (2009). The water footprint of sugar and sugar-based ethanol, (April). Secretaría de Energía (SENER); Agencia Internacional de Energía (AIE). (2011). Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos, 168.
- SEMARNAT. (2014). *Programa Estatal de Educación Capacitación y Cultura Ambiental para la Sustentabilidad en Condiciones de Cambio Climático*. (M. Hurtado, L. Uribe, T. del niño J. Maldonado, & L. Tamayo, Eds.) (1ra ed.). Morelos, México: Unidad de Ipermedios UAEM.
- SENER. (2011). Balance nacional de energía 2010, 184.
- SENER. (2015). Balance nacional de energía 2014, 184.
- Serrano-ruiz, J. C., & Luque, R. (2011). Biocombustibles líquidos : procesos y tecnologías, *107*, 383–389.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2017). http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- Slade, R., Bauen, A., & Shah, N. (2009). The greenhouse gas emissions performance of cellulosic ethanol supply chains in Europe. *Biotechnology for Biofuels*, *2*(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-2-15>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Nrel, D. C. (2012). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass, *2011*(April 2008). <https://doi.org/NREL/TP-510-42618>
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review q. *Bioresource Technology*, *83*(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)
- Szulczyk, Kenneth. (2010). Which is a better transportation fuel - Butanol or ethanol?. *International Journal of Energy and Environment*. 1.
- Väisänen, S., Havukainen, J., Uusitalo, V., Havukainen, M., Soukka, R., & Luoranen, M. (2016). Carbon footprint of biobutanol by ABE fermentation from corn and sugarcane. *Renewable Energy*, *89*, 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.016>
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(7), 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- Valdez-Vazquez, I., & Sanchez, A. (2017). Proposal for biorefineries based on mixed cultures for lignocellulosic biofuel production: a techno-economic analysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1–12. <https://doi.org/10.1002/bbb.1828>
- Vargas-Ramirez, J. M., Wiesenborn, D. P., Ripplinger, D. G., & Pryor, S. W. (2017). Carbon footprint of industrial-beet sugars stored as raw thick juice for use as a fermentation feedstock. *Journal of Cleaner Production*, *162*, 1418–1429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.153>
- Venegas, R. (2016). Producción y comercialización del maíz en México, cobertura de riesgo con derivados, 1–21.
- Wang, X., Li, X., Fischer, G., Sun, L., Tan, M., XiN, L., & Liang, Z. (2015). Impact of the

- changing area sown to winter wheat on crop water footprint in the North China Plain. *Ecological Indicators*, 57, 100–109.
- Wang, Z. B., Wen, X. Y., Zhang, H. L., Lu, X. H., & Chen, F. (2015). Net energy yield and carbon footprint of summer corn under different N fertilizer rates in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1534–1541.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61042-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61042-5)
- Wang, Z., Zhang, H., Lu, X., Wang, M., Chu, Q., Wen, X., & Chen, F. (2015). Lowering carbon footprint of winter wheat by improving management practices in North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 112, Part(2), 149–157.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.084>
- Waterfootprint. (2002). Manual de Evaluacion HH. Retrieved from
<http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>
- Wiloso, E. I., Heijungs, R., & De Snoo, G. R. (2012). LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5295–5308.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.035>
- Wu, M., Mintz, M., Wang, M., & Arora, S. (2009). Water consumption in the production of ethanol and petroleum gasoline. *Environmental Management*, 44(5), 981–997.
<https://doi.org/10.1007/s00267-009-9370-0>
- Xu, X., & Lan, Y. (2017). Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China. *Journal of Cleaner Production*, 146, 218–227.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.181>
- Zhao, X., Zhang, L., & Liu, D. (2012). Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256.
<https://doi.org/10.1002/bbb>

10. ANEXOS

ANEXO A. Cuestionario empleado para levantamiento de inventarios. Adaptación del cuestionario desarrollado por el Dr. Julio Sacramento Rivero de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) para maíz.

DATOS

- Fecha:
- Nombre del productor:
- Teléfono del productor:
- Estado/Ciudad/Nombre del ejido/Nombre de la parcela:
- Grado de estudios:
 - *Dar hoja de presentación
 - *Firmar hoja de consentimiento que salga en los agradecimientos de la publicación

PREPARACIÓN DE TERRENO

1. El terreno de ¿Cuántas hectáreas es?
2. ¿Cómo prepara su terreno?
3. ¿Usa agua?
4. ¿Cuánta agua?
5. ¿De dónde viene el agua?
6. ¿Cuánto le cuesta el agua?
7. ¿Qué tipo de labranza usa?
8. ¿Qué maquinaria usa para la preparación del terreno?
9. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la preparación del terreno?
10. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la preparación del terreno?
11. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria?
12. ¿Usted usa la maquinaria?
13. ¿Cómo controla la maleza?
14. ¿Usa pesticidas?
15. ¿Cómo aplica el pesticida?
16. ¿Cuánto pesticida usa?
17. ¿Cuánto le cuesta el pesticida?
18. ¿Usted va y lo compra?
19. ¿Qué tan lejos lo compra?
20. ¿Usted hace la preparación del terreno?
21. ¿Le ayudan a hacer la preparación del terreno?
22. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan para la preparación del terreno?
23. ¿Son trabajadores por temporada?
24. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
25. ¿De qué edad son estos trabajadores?
26. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en la preparación del terreno?
27. ¿Este terreno es de usted o es rentado?
 - Si es rentado ¿en cuánto lo renta y cuántas hectáreas renta?
 - Si es propio ¿Cuánto le costó el terreno?
28. ¿Cuál es el costo de preparar el terreno

CULTIVO

29. ¿Qué variedad de maíz siembra?
30. ¿Cómo adquirió la semilla?
 - a. Compra
 - i. ¿Cuánto compró?
 - ii. ¿A quién se la compró?
 - iii. ¿Dónde la compró?
 - iv. ¿Usted fue por la semilla?
 - v. ¿Qué tan lejos?
 - b. Donación
 - i. ¿Quién la donó?
 - ii. ¿Cuánto donó?
31. ¿Cuál es el rendimiento de su cultivo por hectárea?
32. ¿En qué mes siembra y cosecha el cultivo?
33. ¿Qué cantidad de plantas siembra por metro cuadrado?
34. ¿Qué distancia existe entre las plantas?
35. ¿Qué tipo de riego realiza en este cultivo?
36. ¿Cuánta agua usa para riego?
37. ¿De dónde viene el agua?
38. ¿Cuánto le cuesta el agua?
39. ¿Usa agua para otra actividad que no sea riego? ¿cuál y aproximadamente cuánta?
40. ¿Qué maquinaria usa para la siembra del cultivo?
41. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
42. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
43. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para la siembra del cultivo?
44. ¿Usted usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
45. ¿Usa pesticida para la siembra del cultivo?
46. ¿Cómo aplica el pesticida para la siembra?
47. ¿Cuánto pesticida usa?
48. ¿Cómo cuanto gasta en pesticidas para la siembra?
49. ¿Usted lo compra?
50. ¿Qué tan lejos lo compra?
51. ¿Usa fertilizante durante la siembra?
52. ¿Cómo aplica el fertilizante?
53. ¿Cuánto fertilizante usa?
54. ¿Cuánto le cuesta el fertilizante?
55. ¿Usted va y lo compra?
56. ¿Qué tan lejos lo compra?
57. ¿Usted hace la siembra del cultivo?
58. ¿Le ayudan a hacer la siembra del cultivo?
59. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan en la siembra del cultivo?
60. ¿Son trabajadores por temporada?
61. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
62. ¿De qué edad son estos trabajadores?
63. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en la siembra del cultivo?

MANTENIMIENTO

64. ¿Cómo cuida a las plantas en su crecimiento?
65. ¿Usa agua para el crecimiento de la planta?
66. ¿Cuánta agua usa para el crecimiento de la planta?
67. ¿De dónde viene el agua para el crecimiento de la planta?
68. ¿Cuánto le cuesta el agua para el crecimiento de la planta?
69. ¿Qué maquinaria usa para el crecimiento de la planta?
70. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
71. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
72. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para el crecimiento de la planta?
73. ¿Usted usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
74. ¿Usa pesticida para el crecimiento de la planta?
75. ¿Cómo aplica el pesticida para el crecimiento de la planta?
76. ¿Cuánto pesticida usa para el crecimiento de la planta?
77. ¿Cuánto le cuesta el pesticida para el crecimiento de la planta?
78. ¿Usted va y lo compra?
79. ¿Qué tan lejos lo compra?
80. ¿Usa fertilizante para el crecimiento de la planta?
81. ¿Cómo aplica el fertilizante para el crecimiento de la planta?
82. ¿Cuánto fertilizante usa para el crecimiento de la planta?
83. ¿Cuánto le cuesta el fertilizante para el crecimiento de la planta?
84. ¿Usted va y lo compra?
85. ¿Qué tan lejos lo compra?
86. ¿Usted hace el mantenimiento para el crecimiento de la planta?
87. ¿Le ayudan a hacer el crecimiento de la planta?
88. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan en el mantenimiento de la planta?
89. ¿Son trabajadores por temporada?
90. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
91. ¿De qué edad son estos trabajadores?
92. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en el crecimiento de la planta?

COSECHA

93. ¿Cómo cosecha las plantas?
94. ¿Usa agua para la cosecha de la planta?
95. ¿Cuánta agua usa para la cosecha de la planta?
96. ¿De dónde viene el agua para la cosecha de la planta?
97. ¿Cuánto le cuesta el agua para la cosecha de la planta?
98. ¿Qué maquinaria usa para la cosecha de la planta?
99. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la cosecha de la planta?
100. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la cosecha de la planta?
101. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para la cosecha de la planta?
102. ¿Usted usa la maquinaria para la cosecha de la planta?
103. ¿Usa pesticida para la cosecha de la planta?
104. ¿Cómo aplica el pesticida para la cosecha de la planta?
105. ¿Cuánto pesticida usa para la cosecha de la planta?
106. ¿Cuánto le cuesta el pesticida para la cosecha de la planta?
107. ¿Usted va y lo compra?

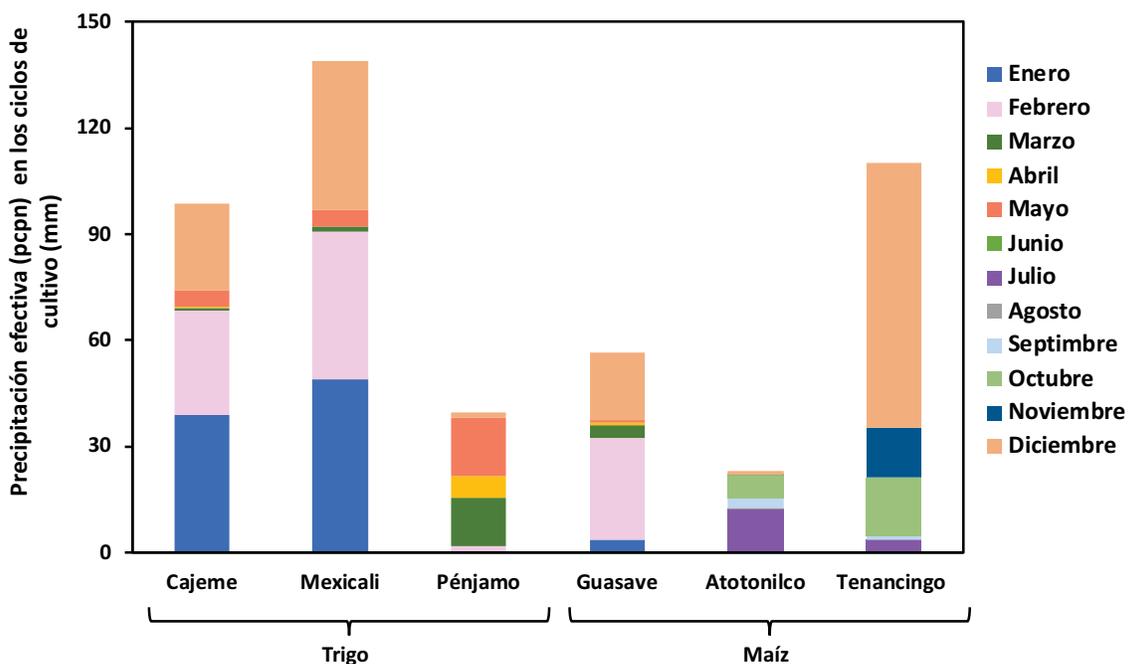
108. ¿Qué tan lejos lo compra?
109. ¿Usted hace la cosecha de la planta?
110. ¿Le ayudan a hacer la cosecha de la planta?
111. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan en la cosecha de la planta?
112. ¿Son trabajadores por temporada?
113. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
114. ¿De qué edad son estos trabajadores?
115. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en el crecimiento de la planta?
116. Para vender el producto principal ¿le hace alguna cosa?
117. ¿Usted a quién vende el producto?
118. ¿En cuánto vende el producto?
119. Usted transporta el producto principal o viene el comprador por el producto
120. ¿sabe cuál es el costo de transportar el producto al punto de venta?
121. ¿Almacena algo de lo que cosecha?
- a. Si lo hace: cuánto almacena y hasta cuánto puede almacenar
122. En este terreno, usted solo siembra Maíz, trigo, agave, caña (según corresponda) ¿o siembra otros cultivos?
123. ¿Y después de cosechar, hace rotación de tierra con otros cultivos? ¿Cuáles?
124. Disculpe, ¿usted recibe algún tipo de apoyo del gobierno para realizar la siembra de su cultivo?
125. ¿Tiene una idea de cuánto le cuesta en general todo el cultivo desde que prepara el terreno hasta que hace la cosecha?
126. ¿Durante el periodo de cultivo, ha tenido pérdidas de producto?
- a. Si: ¿Como cuánto? ¿A qué se deben esas pérdidas?
127. ¿Le reporta a alguna organización acerca del estado de su cultivo?
- a. Si, ¿A quién?
- b. ¿De qué forma lo reporta?
- c. ¿Cada cuánto tiempo?

RESIDUOS

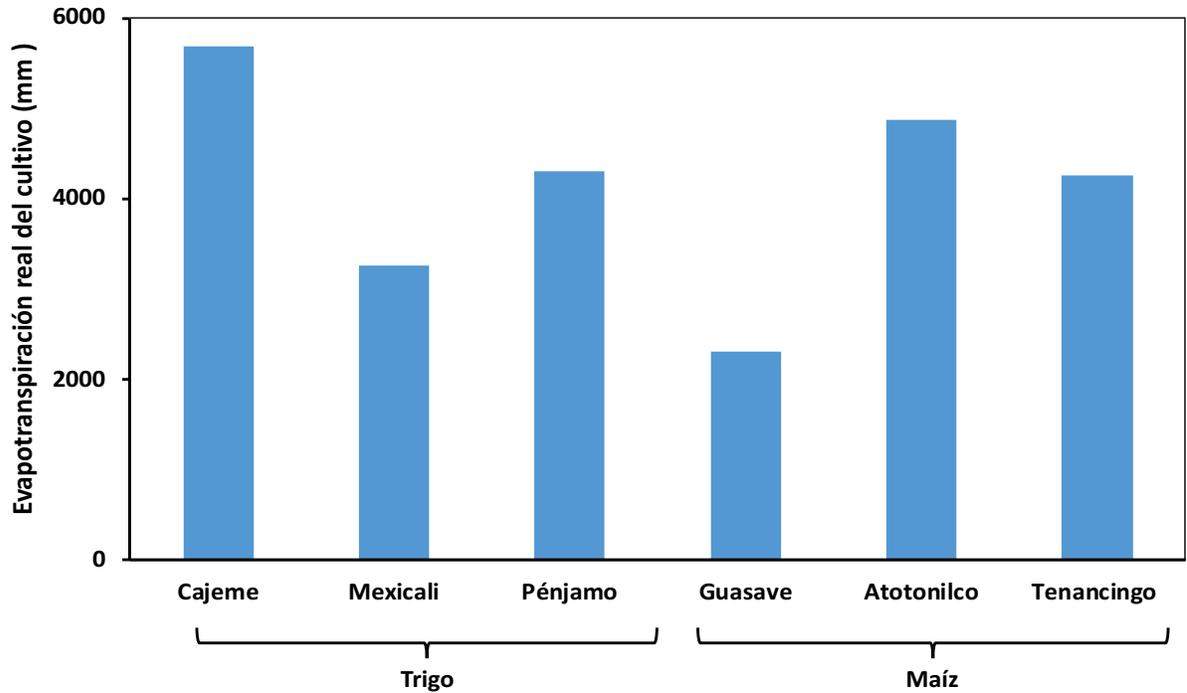
128. ¿Tiene rastros o restos del cultivo al final de la cosecha?
129. ¿Qué hace con estos rastros?
130. ¿Cómo los recolecta?
131. ¿Usa maquinaria?
132. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria?
133. ¿Cuánto diésel usa la maquinaria?
- Si vende, ¿A quién le vende estos? ¿Para que los usa la persona a quién se los vende?
 - ¿En cuánto se los vende?
 - ¿Usted lleva los restos a alguien o vienen por ellos?
 - ¿Cómo los transporta?
 - No vende, ¿Qué le hace?
134. ¿Estaría dispuesto a vender esto que le queda?
135. ¿A quién se los vendería?
136. ¿En cuánto se los vendería?
137. ¿Cuánta agua emplea durante toda la producción? ¿Cuánta en cada etapa?

138. ¿Cuáles residuos genera?
139. ¿Qué hace con los residuos generados?
140. ¿Qué maquinaria emplea para recolectar los residuos generados?
141. ¿Qué cantidad de residuos se mantienen en el campo para la siguiente cosecha?
142. Cuando deja los residuos en el campo ¿Disminuye la cantidad de fertilizante necesario para la siguiente siembra?
143. ¿Vendería una parte o totalmente los residuos del cultivo? ¿A quién se la vendería? ¿Para qué uso la vendería? ¿En cuánto la vendería?

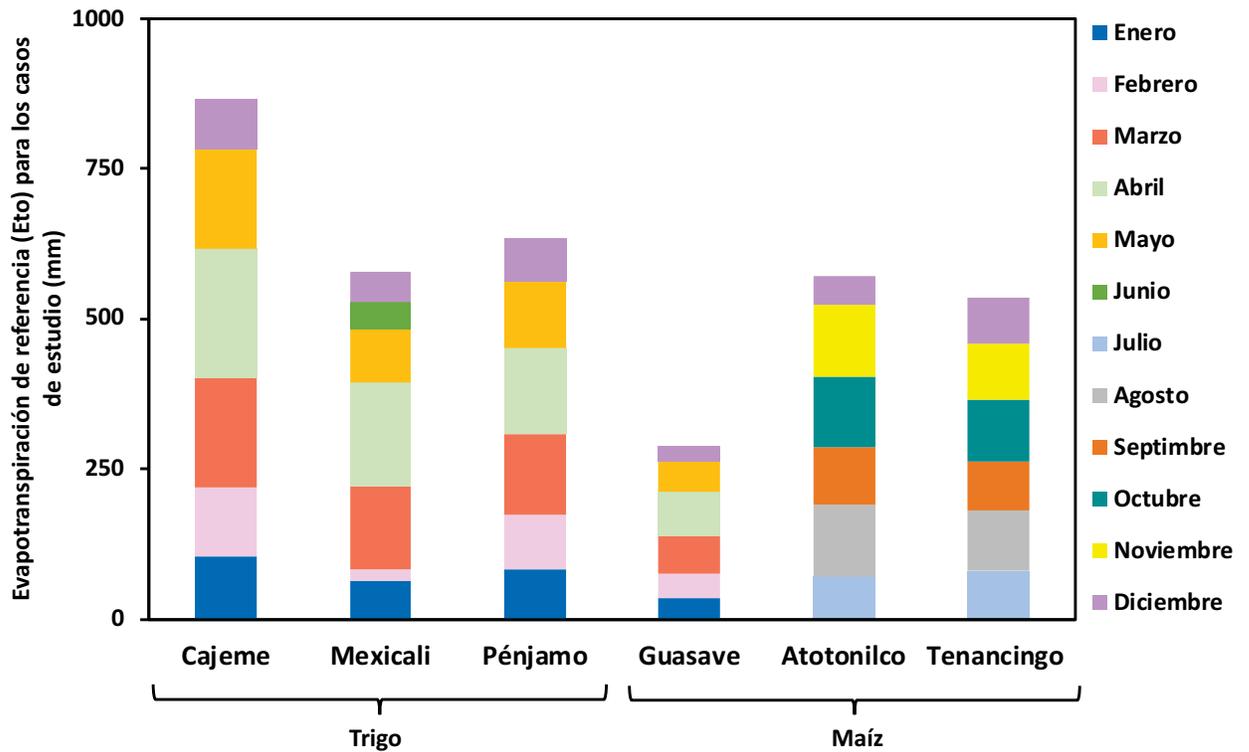
ANEXO B. Gráfica de la precipitación efectiva (pcpn) en los ciclos de cultivo de trigo y maíz en mm.



ANEXO C. Gráfica de la evapotranspiración real del cultivo o requerimientos de agua de la planta (ETc) en mm.



ANEXO D. Gráfica de la evapotranspiración de referencia de los casos de estudio (ETo) en mm.



ANEXO E. Municipios que cumplen con el rendimiento de producción de paja de trigo y maíz a nivel nacional en los años 2011-2015.

Producción de rastrojos de maíz							
(t de biomasa seca)							
Estado	Municipio	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio
Jalisco	Atotonilco El Alto	157,576	151,101	182,482	176,368	192,973	172,100
	La Barca	293,622	369,565	381,623	386,073	380,166	362,210
	Lagos de Moreno	95,975	229,910	251,616	185,551	147,946	182,199
	San Martín Hidalgo	99,765	134,148	165,931	203,662	221,370	164,975
Sinaloa	Angostura	377,750	100,021	161,922	198,499	540,889	275,816
	Ahome	933,467	1,418,087	934,906	1,150,998	1,327,392	1,152,970
	Culiacán	843,974	1,131,430	1,065,623	1,009,838	1,471,314	1,104,436
	El Fuerte	59,761	208,470	99,946	143,471	222,902	146,910
	Elota	179,547	189,064	276,527	252,050	304,994	240,436
	Guasave	922,517	1,179,244	1,358,584	1,273,951	1,860,304	1,318,920
	Navolato	637,320	686,609	950,651	908,375	1,261,712	888,934
	Sinaloa	238,911	325,000	301,371	307,840	606,776	355,980
Michoacán	Vista Hermosa	107,148	130,616	177,900	203,701	176,828	159,238
Estado de México	Almoloya de Juárez	23,306	13,875	209,284	104,124	153,103	124,738
	Ixtlahuaca	21,932	122,730	174,228	134,047	178,908	126,369

Producción de paja de trigo							
(t de biomasa seca)							
Estado	Municipio	2010	2011	2012	2013	2014	Promedio

Baja California	Mexicali	919,578	722,887	699,371	771,270	780,441	778,710
Guanajuato	Pénjamo	150,806	229,635	116,167	21,945	79,500	119,610
	Benito Juárez	218,013	233,240	263,365	300,191	269,312	256,824
	Bácum	293,032	19,793	195,254	218,752	202,210	221,328
	Cajeme	609,553	583,567	724,197	802,940	710,542	686,160
Sonora	Etchojoa	439,630	399,784	387,536	426,809	376,776	406,107
	Huatabampo	224,378	227,153	178,943	217,069	210,572	211,623
	Navojoa	413,715	393,346	293,034	482,043	372,091	390,846
	San Ignacio Río Muerto	128,500	173,773	193,101	228,645	206,349	186,074