



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



# **Análisis de un esquema de biorrefinería mediante criterios de sustentabilidad**

**TESIS**

para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería**

**Presenta:**

Ing. César Armando Ramírez de León

**Director:**

Dr. Juan Barajas Fernández



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura

CARTA CERTIFICADO DE NO PLAGIO

El que suscribe César Armando Ramírez de León, egresado del programa educativo Maestría en Ciencias en Ingeniería, con número de matrícula 172D19002, expreso mediante la presente, que he elaborado el documento que lleva por título:

"Análisis de un esquema de biorrefinería mediante criterios de sustentabilidad"

correspondiente al trabajo recepcional para titulación en la modalidad de Tesis  
para optar por el grado de Maestro

declarando lo siguiente:

1. Que el contenido del documento es de autoría propia y que no ha sido copiado de ningún otro trabajo de investigación, afirmando que no existe plagio de ninguna naturaleza, y que cito apropiadamente las ideas, ecuaciones e ilustraciones diversas, que tienen derechos de autor.
2. Que el presente trabajo es resultado de mi investigación y que no ha sido publicado ni parcial ni totalmente, en otro documento para la obtención de un grado diferente al que estoy por optar.
3. Que soy responsable del contenido del presente trabajo y que asumo las consecuencias ante terceros que se deriven de cualquier falta, error u omisión de las referencias presentadas en el documento de tesis.

Finalmente, reconozco que, ante cualquier detección de plagio, respetaré lo dispuesto en materia ética y legal que la legislación de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco indique.

Cunduacán, Tabasco a 20 de Febrero de 2020.

César Armando Ramírez de León

Nombre y firma del autor del documento

## CARTA DE AUTORIZACIÓN

JEFATURA DEL ÁREA DE PONGRADO

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice, tanto física como digitalmente, la tesis de grado denominada "Análisis de un esquema de biorrefinería mediante criterios de sustentabilidad", de la cual soy autor y titular de los derechos de autor. La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión educativa y sin fin de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Biblioteca Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que las universidades tengan relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en el documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 20 días del mes de febrero del año 2020.

Autorizó

  
César Armando Ramírez de León  
El tesista



**JEFATURA DEL ÁREA DE POSGRADO**

S

Cunduacán, Tabasco, a 25 de octubre de 2019  
MEM/MCI/026/2019

**PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ**  
DIRECTOR DE LA DAIA  
**DE: COMISIÓN SINODAL**  
**ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRÍA**

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE UN ESQUEMA DE BIORREFINERÍA MEDIANTE CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD"**

Desarrollado por el C. ING. CÉSAR ARMANDO RAMÍREZ DE LEÓN de la Maestría en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

**COMISIÓN SINODAL**

  
DRA. KARLA MARÍA AGUILAR  
CASTRO  
PRESIDENTE

  
DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ  
RIVERA  
SECRETARIO

  
DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ  
VOCAL 1

  
DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN  
RIVERA TREJO  
VOCAL 2

  
DRA. MARÍA DE LOS ANGELES  
OLÁN ACOSTA  
VOCAL 3



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura**



**DIRECCIÓN**

**OFICIO:** DIR/DAIA/284/2020  
**FECHA:** 23 de enero de 2020  
**ASUNTO:** El que se indica

**C. ING. CÉSAR ARMANDO RAMÍREZ DE LEÓN**  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE UN ESQUEMA DE BIORREFINERÍA MEDIANTE CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD"**

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Juan Barajas Fernández ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ**  
DIRECTOR

C.c.p. Archivo

DRA'MAAL/apl"

## **Dedicatoria**

A mi padre, Bernardino Ramírez Cruz:

Quien se adelantó en el camino de la vida a casi un mes antes de iniciar esta gran travesía de la maestría, de quien pude contar con su aprobación y apoyo para continuar con mi formación profesional, y que pude ver en sus ojos una gran alegría.

Sé que te fuiste tranquilo al verme ya como un hombre de bien (aunque reconozco como ser humano que en ciertas ocasiones te fallé); y contento por haber tenido entre tus brazos a tu nieta: Abril Natalia, ella igual te recuerda y extraña. Un enorme beso y fuerte abrazo, el título obtenido es a tu memoria.

Que en paz descanses.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado con la beca dentro del Programa Nacional de Posgrados de Calidad, con la cual pude realizar la investigación correspondiente, y así, obtener el grado de Maestro.

A mi esposa e hija, Ana Corina y Abril Natalia, quienes siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, quienes han sido y fueron mis pilares para poder concluir con los estudios de maestría. Sé que no fue un camino tan fácil. Con las que estoy sumamente agradecido por soportar días, e incluso semanas casi sin mí. Este logro es también para ustedes, y solo falta el siguiente, que sin duda alguna sé que lo vamos a lograr aunque nos cueste en un principio.

Al Dr. Juan Barajas Fernández, quien me brindó su confianza para poder realizar la presente investigación. Quien con sus conocimientos y gran experiencia me encaminó al desarrollo de la misma. Y a quien estimo por ser un modelo de vida a seguir.

A mis compañeros de maestría, con quienes compartí – en el primer semestre – aula y gratos momentos. Aunque al final terminamos separados por la naturaleza de nuestras investigaciones, cada vez que nos veíamos era como un reencuentro después de un largo tiempo.

A los Doctores de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, quienes compartieron sus experiencias en los temas que nos impartieron a lo largo de la maestría, muchas gracias a cada uno.

## Resumen

En el presente trabajo se realizó un análisis integral de sustentabilidad de dos esquemas de biorrefinerías: uno como sistema integrado a un ingenio azucarero y otro como sistema independiente al ingenio. Este análisis se hizo mediante la aplicación de metodologías, como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una evaluación tecno-económica y un análisis social. Se consideró cada uno de los procesos involucrados para la obtención del bagazo como fuente de materia prima para la biorrefinería, los cuales fueron principalmente: preparación de caña, molinos, calderas y planta de tratamiento de agua. En el Análisis de Ciclo de Vida, se realizó un Inventario del Ciclo de Vida en cada uno de los procesos mencionados, obteniendo que los gases de salida de las calderas del ingenio son los que causan un mayor impacto ambiental, teniendo que la biorrefinería como sistema integrado es 56 % sustentable y como sistema independiente resulta en un valor de -2 037 %, este último siendo totalmente no sustentable. Se hizo la comparación de los esquemas de la biorefinería, respecto a datos reportados de emisiones base en las refinerías de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Económicamente, la biorefinería integrada a un ingenio azucarero es viable, ya que la venta de productos del este mismo, subsidia a la biorrefinería, contrario a una biorefinería como sistema independiente, la cual es totalmente inviable económicamente. Finalmente, la biorefinería integrada al ingenio azucarero es 27% sustentable socialmente, en la generación de empleos y la inversión económica para la sociedad. Obteniendo para la biorrefinería como sistema independiente un porcentaje de -19% en el análisis social. En general, la biorrefinería como sistema integrado al ingenio azucarero resulta en un 67.25 % sustentable, dentro de los límites de sustentabilidad.

## Abstract

In this work, an integral sustainability analysis of two biorefinery schemes was performed: one as a system integrated to a sugarcane industry and another as a system independent from it. This analysis was done through the application of methodologies, such as the Life Cycle Analysis (LCA), a techno-economic analysis and a social analysis. It considered each process involved for obtaining bagasse as a source of raw material for biorefinery, which were mainly: sugarcane preparation, mills, boilers and water treatment plant. In the Life Cycle Analysis, a Life Cycle Inventory was performed in each of the aforementioned processes, obtaining that the output gases from the boilers of the sugarcane industry are those that cause the greatest environmental impact, having the biorefinery as a system integrated is 56% sustainable and as an independent system results in a value of -2.037%, being fully unsustainable. The results of the biorefinery schemes were compared with respect to reported data on base emissions at the Petróleos Mexicanos (PEMEX) refineries. Economically, the biorefinery integrated to a sugar mill is feasible, since the sale of products from the same, subsidizes biorefinery, contrary to a biorefinery as an independent system, which is totally economically unfeasible. Finally, the biorefinery integrated to the sugarcane industry is 27% socially sustainable, in the generation of jobs and economic investment for society. Obtaining for the biorefinery as an independent system a percentage of -19% in the social analysis. In general, biorefinery as a system integrated to the sugar mill results in 67.25% sustainable, within the limits of sustainability.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes del problema . . . . .	1
1.2	Objetivos de la investigación . . . . .	5
1.2.1	Objetivo general . . . . .	5
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	5
1.3	Hipótesis . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1	Biorrefinería . . . . .	6
2.1.1	Definición . . . . .	6
2.1.2	Tipos de biorrefinerías . . . . .	7
2.1.3	Biorrefinería de lignocelulosa como materia prima . . . . .	9
2.1.4	Retos y oportunidades . . . . .	11
2.1.5	Productos . . . . .	12
2.2	La sustentabilidad . . . . .	13
2.2.1	Dimensión social . . . . .	14
2.2.2	Dimensión económica . . . . .	15
2.2.3	Dimensión ambiental . . . . .	15
2.3	El Análisis de Ciclo de Vida . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>19</b>
3.1	Determinación del excedente de bagazo en un ingenio azucarero . . . . .	20
3.2	Definición del esquema de la biorrefinería . . . . .	23
3.2.1	Equipamiento requerido para la biorrefinería . . . . .	26

3.3	Análisis de sustentabilidad . . . . .	31
3.3.1	Análisis del Ciclo de Vida . . . . .	32
3.3.1.1	Planta de tratamiento de agua . . . . .	32
3.3.1.2	Gases de salida . . . . .	35
3.3.1.3	Biorrefinería . . . . .	37
3.3.1.4	Proceso de molienda . . . . .	38
3.3.2	Evaluación Tecno-Económica . . . . .	38
3.3.3	Evaluación Social . . . . .	42
3.3.4	Evaluación de Sustentabilidad . . . . .	43
3.3.4.1	Valorización del Potencial Biotecnológico Normalizado (VPBN) . . . . .	44
3.3.4.2	Consumo de Materia Prima (CMP) . . . . .	45
3.3.4.3	Fracción de Ingreso por la Materia Prima (FIMP) . . . . .	45
3.3.4.4	Reducción del Uso de Agua Fresca (RUAF) . . . . .	45
3.3.4.5	Margen Bruto Modificado (MBM) . . . . .	46
3.3.4.6	Relación de Costo de Materia Prima (RCMP) . . . . .	46
3.3.4.7	Reducción de Emisiones Base (REB) de la biorrefinería . . . . .	47
3.3.4.8	Inversión Social (SI) . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>50</b>
4.1	Cálculo de bagazo excedente como indicador de abundante biomasa para el esquema de biorrefinería . . . . .	50
4.2	Definición del esquema de biorrefinería . . . . .	53
4.2.1	Constitución de equipos para la biorrefinería . . . . .	53
4.3	Análisis de Sustentabilidad . . . . .	54
4.3.1	Análisis del Ciclo de Vida . . . . .	54
4.3.1.1	Planta de tratamiento de agua . . . . .	55
4.3.1.2	Gases de salida . . . . .	56
4.3.1.3	Biorrefinería . . . . .	61
4.3.1.4	Proceso de molienda . . . . .	64
4.3.2	Evaluación Tecno-Económica . . . . .	65
4.3.2.1	Escenario 1: Biorrefinería como sistema independiente . . . . .	66

4.3.2.2	Escenario 2: Biorrefinería como sistema integrado . . . . .	67
4.3.3	Evaluación Social . . . . .	68
4.4	Evaluación de Sustentabilidad . . . . .	70
4.4.1	Valorización del Potencial Biotecnológico Normalizado (VPBN) . . . . .	70
4.4.2	Consumo de Materia Prima (CMP) . . . . .	73
4.4.3	Fracción de Ingreso por Materia Prima (FIMP) . . . . .	73
4.4.4	Reducción del Uso de Agua Fresca (RUAF) . . . . .	74
4.4.5	Margen Bruto Modificado (MBM) . . . . .	75
4.4.6	Relación de Costo de Materia Prima (RCMP) . . . . .	75
4.4.7	Reducción de Emisiones Base (REB) . . . . .	76
4.4.8	Inversión Social (IS) . . . . .	77
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>		<b>79</b>
	Conclusiones . . . . .	79
	Recomendaciones . . . . .	80
<b>Anexos</b>		<b>82</b>
A	Cálculos para la determinación de excedente de bagazo en un ingenio azucarero	83
B	Distribución de criterios con sus respectivos puntajes para la valorización de la materia prima para la biorrefinería . . . . .	89
C	Cálculo del excedente de bagazo con una cantidad de 298.81 t de caña entrante al ingenio por hora . . . . .	93
<b>Referencias</b>		<b>99</b>

## Índice de Figuras

1.1	Distribución de ingenios azucareros en el territorio mexicano. <sup>1</sup> . . . . .	2
2.1	Comparación entre una refinería convencional y una biorrefinería. Adaptado del trabajo de Realff and Abbas <sup>2</sup> . . . . .	6
2.2	Diagrama simplificado de una biorrefinería con lignocelulosa como materia prima. Adaptado del trabajo de Clark and Deswarte <sup>3</sup> . . . . .	9
2.3	Ejemplo del proceso de una biorrefinería en Suiza con lignocelulosa como materia prima. Adaptado del trabajo de Gravitis <sup>4</sup> . . . . .	10
2.4	La comunidad relacionada en sus tres partes. <sup>5</sup> . . . . .	14
2.5	Fases de un ACV, de acuerdo con la serie de normas ISO-14040. <sup>6</sup> . . . . .	17
2.6	Criterios de delimitación para un Análisis de Ciclo de Vida. <sup>7</sup> . . . . .	18
3.1	Esquema general de flujo de molienda de la caña de azúcar. . . . .	23
3.2	Esquema general de un ingenio azucarero. . . . .	24
3.3	Esquema general de la biorrefinería integrada a un ingenio azucarero. . . . .	25
3.5	Etapa de hidrólisis ácida. . . . .	26
3.4	Configuración general de los equipos para la biorrefinería. <sup>8</sup> . . . . .	27
3.6	Etapa de sacarificación enzimática. . . . .	28
3.7	Etapa de tratamiento del líquido hidrolizado. . . . .	29
3.8	Etapa para la producción de células. . . . .	29
3.9	Etapa para la producción de etanol. . . . .	30
3.10	Etapa para la producción de furfural. . . . .	31
3.11	Delimitación del esquema de biorrefinería para el Análisis de Ciclo de Vida. . .	32
3.12	Esquema general de una planta de tratamiento de agua. . . . .	33

---

3.13 Principales procesos de la etapa de pretratamiento de agua. . . . .	34
3.14 Características geométricas de una caldera. Adaptado del trabajo reportado por Centeno-González et al. <sup>9</sup> . . . . .	36
3.15 Segundo esquema de biorrefinería. Adaptado del trabajo reportado por Ali Mandegari et al. <sup>10</sup> . . . . .	42
4.1 Esquema general del proceso de molienda. . . . .	64

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Índice de Tablas

2.1	Clasificación de tipos de biorrefinerías de acuerdo con el tipo de materia prima.	10
2.2	Comparación de una petro-refinería con una biorrefinería. <sup>60</sup>	11
3.1	Tipos de desechos de un ingenio azucarero y el uso de cada uno de ellos. Fuente propia.	19
3.2	Productos obtenidos por etapas. <sup>8</sup>	31
3.3	Insumos por etapas reportados por Ghosh et al. <sup>8</sup>	37
3.4	Temperatura y tiempo de residencia por etapa del proceso.	38
3.5	Consideraciones para el diseño de ingeniería y construcción de la biorrefinería.	39
3.6	Consideraciones para los parámetros de inversión para la biorrefinería.	40
3.7	Precios de los insumos para la biorrefinería.	41
3.8	Costos instalados por etapa Ali Mandegari et al. <sup>10</sup>	42
3.9	Indicadores para la evaluación de sustentabilidad de una biorrefinería.	43
4.1	Parámetros obtenidos del ingenio azucarero local.	50
4.2	Resultados de la metodología para el cálculo de bagazo excedente en un ingenio azucarero.	51
4.3	Cantidad de productos obtenidos por etapas.	53
4.4	Insumos utilizados en la planta de tratamiento de agua.	55
4.5	Balance de masa de los gases de salida reportado por Centeno-González et al. <sup>9</sup>	57
4.6	Análisis elemental del bagazo <sup>9</sup> .	59
4.7	Análisis aproximado del bagazo <sup>9</sup> .	59
4.8	Balance de masa de los gases de salida.	59

---

4.9	Impacto de los gases derivados de la combustión del bagazo, de acuerdo al Eco-Indicador 99. . . . .	60
4.10	Resultados del LCA mediante la metodología CML - IA. . . . .	61
4.11	Parámetros para calcular el bagazo excedente para la biorrefinería con una entrada de 298.81 t · h <sup>-1</sup> de caña al ingenio . . . . .	62
4.12	Insumos para la cantidad de 8.02 t de bagazo de acuerdo con lo reportado por Ghosh et al. <sup>8</sup> . . . . .	63
4.13	Cantidad de productos obtenidos por etapas al procesar 8.02 t de bagazo. . . . .	63
4.14	Consideraciones para el diseño de ingeniería y construcción de la biorrefinería como sistema independiente. . . . .	66
4.15	Evaluación Tecno-Económica de una biorrefinería como sistema independiente. . . . .	66
4.16	Evaluación Tecno-Económica de una biorrefinería como sistema integrado. . . . .	67
4.17	Análisis de los puestos generados para el esquema de biorrefinería. Fuente propia. . . . .	70
4.18	Evaluación del potencial del bagazo como materia prima para la biorrefinería. . . . .	71
4.19	Indicadores de sustentabilidad de una biorrefinería integrada a un ingenio azucarero y una biorrefinería como sistema independiente. . . . .	78
B.1	Distribución de criterios con sus respectivos puntajes para la valorización de la materia prima para la biorrefinería. <sup>11</sup> . . . . .	89

# 1 | Introducción

## 1.1. Antecedentes del problema

La Agencia Internacional de Energía (IEA) ha estimado que el consumo global de energía se incrementará un 53 % para el año 2030<sup>12</sup> y que el consumo total de energía de los países en desarrollo excederán el de los países desarrollados<sup>13</sup> esto debido a la industrialización acelerada y crecimiento social de los países subdesarrollados que se vive hoy en día, los cuales son la mayoría respecto a los países desarrollados. A finales del año 2018, se realizaron cálculos de reservas de recursos fósiles para consumo, de los cuales se tienen: 1730 billones de barriles para 50 años, 196.9 trillones de metros cúbicos de gas natural para 50.9 años, y por último, 1055 billones de toneladas de carbón para 132 años.<sup>14</sup> Es evidente que el petróleo, fuente de energía en el mundo, cuenta con un corto periodo de vida; aunque por otro lado, se han descubierto nuevos yacimientos que abonan con esta cantidad reportada a finales del año 2018. Sin embargo, el tema más preocupante es la emisión de gases de efecto invernadero, lo cual ha contribuido con severos cambios climáticos en los últimos años.

Por lo anterior, los países están implementando políticas para incentivar la producción y el uso de energías renovables y así reducir la dependencia de combustibles fósiles<sup>15</sup>; el cambio climático y la seguridad energética son motivos de un creciente interés en el uso de biocombustibles.<sup>16</sup> Europa es un ejemplo del crecimiento acelerado en industrias basadas en la producción de biomasa, el cual apunta hacia una economía en el desarrollo de nuevos modelos de negocios con bases sustentables.<sup>17</sup>

En cuanto a México, éste se encuentra en el 9º lugar a nivel mundial en reservas de petróleo, en 4º lugar en reserva de gas natural en América y también es muy rico, en fuentes de energías renovables: con una generación de 12.2 y 2.6  $TW \cdot h^{-1}$ , mediante energía eólica

---

y solar, respectivamente<sup>14</sup>. Sin embargo, el potencial de estos tipos de energías no son explotados en su totalidad; la biomasa tiene el más alto potencial (2 635 a 3 771 PJ/año).<sup>18</sup> De acuerdo a Ley General de Cambio Climático, el país tiene que establecer la meta de generar el 37.5 % de sus necesidades energéticas de recursos renovables para el año 2030 y el 50 % para el 2050.

Para poder contribuir con la solución de los problemas energéticos, ambientales y económicos, así como, también explotar el uso de biomasa en México, se requieren de biorrefinerías. Estas últimas son industrias capaces de producir un amplio rango de productos negociables (alimentos, suministros, materiales y químicos) y de energía (combustibles, energía y calor)<sup>19,20</sup> elaborados a partir de recursos renovables dentro de un esquema de procesamiento sustentable.<sup>21</sup>



Figura 1.1: Distribución de ingenios azucareros en el territorio mexicano.<sup>1</sup>

En México, la industria azucarera es la industria con potencial para la producción de biocombustibles, además que la capacidad para lograr los objetivos de producción de biocombustibles requeridos por el país<sup>22</sup> de acuerdo con los volúmenes de producción y las tecnologías de producción. Además, en este tipo de industria se tienen diversos desechos biológicos, como: bagazo, cachaza (con rico contenido de sacarosa), melaza, aguas residuales (que podrían proliferar microalgas), entre otros, que no son aprovechados en su totalidad. Estos residuos agroindustriales serían punto de partida para establecer un esquema de una biorrefinería - como un sistema integrado dentro de un ingenio azucarero - mediante el uso de materia prima como los desechos biológicos<sup>23,24</sup> y, determinar la sustentabilidad de dicho esquema para que se mantengan o mejoren las condiciones materiales y sociales

---

para la salud humana y del medio ambiente a través del tiempo, esto sin que se exceda la capacidad ecológica que sirva de apoyo<sup>25</sup> o bien, que la materia prima tenga una mayor regeneración comparado con la razón de producción del biocombustible. En la Figura 1.1 se muestra la distribución de ingenios azucareros en México en los cuales se genera 300 kg de bagazo de una tonelada de caña de azúcar<sup>26</sup> y 30 kg promedio de cachaza por tonelada de caña.<sup>27</sup>

Rincón et al.<sup>28</sup> mencionan que una biorrefinería de segunda generación es viable debido a la abundancia de biomasa. Por lo tanto, para la presente investigación se analizaron las investigaciones de diversos autores respecto a las propuestas de esquemas de biorrefinerías presentadas en sus trabajos, los cuales se citan a continuación. Para así establecer de manera concreta, el objetivo de la presente investigación.

Existen investigaciones en las cuales se exponen diversas tecnologías para la producción de biocombustibles a partir de material lignocelulósico (como el bagazo), así como también diversos esquemas propuestos de una biorrefinería<sup>29,30</sup>. Dentro de esos esquemas el proceso de hidrólisis ácida (como etapa de pretratamiento del material lignocelulósico) es un proceso de bajo costo para una biorrefinería, y en donde se obtiene la mayor cantidad de aceites esenciales de la materia prima para la producción de biocombustibles.

Por otra parte, hay investigaciones que demuestran que una biorrefinería integrada a una planta ya existente (la cual puede producir desechos biológicos potenciales para la producción de biocombustibles) se podría considerar como una opción viable, ya que se aprovecharía los flujos de energía y masa.<sup>31-33</sup>

Como se mencionó anteriormente, en un ingenio azucarero se tienen diversos desechos biológicos (bagazo, cachaza, melaza, aguas residuales, entre otros) capaces de servir como materia prima para la producción de biocombustibles. Sin embargo, el bagazo es la principal biomasa que se plantea en diversas investigaciones,<sup>8,34</sup> dada la abundante cantidad de bagazo que se tiene dentro de los ingenios. Ghosh et al.<sup>8</sup> realizaron a nivel laboratorio experimentos para la producción de etanol y furfural, a partir del bagazo de caña de azúcar, en el cual concluyen que una biorrefinería integrada a una planta es redituable y prometedora.

Cuando se habla de un análisis de sustentabilidad, este debe considerar tres dimensiones importantes (ambiental, económico y social) para tener un sistema aún más sustentable<sup>25</sup>. Por lo que la mayoría de los autores omiten el aspecto social, ya sea por el objetivo que tienen

---

establecido desde un principio.

México cuenta con 51 ingenios azucareros, 22 de ellos en el estado de Veracruz, el cual representa el 40 % de la producción nacional. En cuanto a Tabasco, este cuenta con tres ingenios azucareros, los cuales procesaron un total de 33,579,415.6 t de caña obteniendo así, una producción total de 3,027,022.96 t de azúcar, en la zafra 2018/2019.<sup>1</sup>

Los ingenios azucareros durante la temporada de zafra generan desechos biológicos (cachaza, melaza, bagazo) los cuales son fuentes de materia prima para la producción de biocombustibles. El estudio de un esquema de una biorrefinería como un sistema integrado dentro de un ingenio azucarero tomando el bagazo como fuente de materia prima para la producción etanol y furfural, aplicando metodologías como la Análisis de Ciclo de Vida, el Análisis Tecno-Económico y criterios de sustentabilidad, demostraría que cumple con las 3 vertientes de interés: económica, ambiental y social. El estudio será punta de lanza para el desarrollo de futuras biorrefinerías utilizando como fuente de materia prima el bagazo generado por los ingenios azucareros.

Por lo tanto, esta investigación se centra en el análisis de sustentabilidad (teniendo en cuenta los tres aspectos) de una biorrefinería integrada a un ingenio azucarero, considerando los indicadores propuestos por Sacramento-Rivero<sup>35</sup>. Partiendo de la experimentación realizada Ghosh et al.<sup>8</sup> de la biorrefinería, con las recomendaciones establecidas por los autores. La biorrefinería será un sistema integrado y dado que las corrientes de vapor provienen del propio sistema de generación de vapor del ingenio, se tomaron los resultados que Centeno-González et al.<sup>9</sup> (porcentaje de componentes en los gases de salidas de una caldera).

Para la evaluación de impacto ambiental del sistema se considera el Análisis de Ciclo de Vida, ya que se encuentra alineado bajo la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, ISO), específicamente por los estándares ISO 14040 e ISO 14044<sup>6</sup>. Aplicando la metodología del Eco-Indicador 99 (el cual tiene un enfoque orientado hacia el daño) y por la metodología del Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden (CML-IA, el cual tiene un enfoque a los problemas para la evaluación de impacto).<sup>36</sup>

---

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar un esquema de biorrefinería como un sistema integrado dentro un ingenio azucarero, aplicando metodologías y criterios de sustentabilidad para la producción de biocombustible a partir del bagazo como biomasa.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Comprobar las hipótesis de las investigaciones en donde se menciona que este tipo de industria cuenta con abundante biomasa (bagazo).
2. Realizar un Análisis de Ciclo de Vida del esquema de biorrefinería.
3. Realizar un Análisis Tecno-Económico del uso de bagazo para la producción de biocombustible.
4. Realizar un análisis para la creación de nuevos empleos dentro del esquema de biorrefinería, como indicador del aspecto social.
5. Realizar un análisis de la huella hídrica dentro del esquema de biorrefinería.

## **1.3. Hipótesis**

Con la aplicación de la metodología para analizar la sustentabilidad del esquema de biorrefinería integrado a un ingenio azucarero, se determina que es una opción viable para la producción de biocombustible, ya que aprovecha la infraestructura de la planta y el bagazo excedente por día de molienda.

## 2 | Marco teórico

### 2.1. Biorrefinería

#### 2.1.1. Definición

Una biorrefinería es un complejo o red de complejos que convierte la biomasa, incluyendo desperdicios, en una variedad de químicos, biomateriales y energía, maximizando el valor de la biomasa y minimizando los residuos. Este enfoque integrado está ganando demasiado interés comercial y académico en muchas partes del mundo<sup>37,38</sup>. Como se observa en la Figura 2.1, las biorrefinerías son análogas de muchas maneras a lo que son las refinerías convencionales de petróleo.<sup>39</sup>

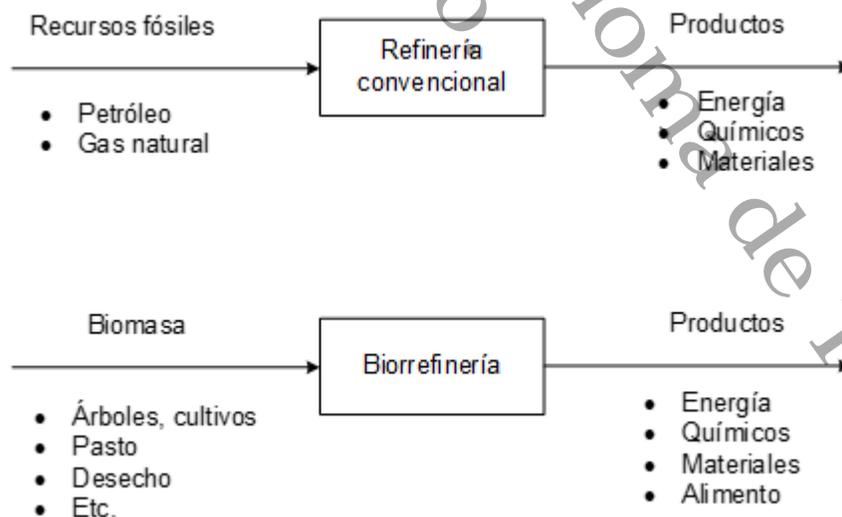


Figura 2.1: Comparación entre una refinería convencional y una biorrefinería. Adaptado del trabajo de Realf and Abbas<sup>2</sup>.

---

Similarmente a una refinería convencional, donde productos químicos y mucha energía son producidos del petróleo, las biorrefinerías producen muchos productos industriales de la biomasa (materia prima).<sup>40</sup>

### 2.1.2. Tipos de biorrefinerías

Existen tres tipos de biorrefinerías:<sup>39</sup>

1. Biorrefinería de primera fase: una sola materia prima, un solo proceso y un solo producto de salida. Existen biorrefinerías de este tipo en operación y ha sido probado su viabilidad económica.<sup>41</sup> Usan aceite vegetal como materia prima y producen cantidades de biodiesel y glicerina a través de un solo proceso llamado transesterificación. Estas biorrefinerías no tienen casi la flexibilidad para recuperar la inversión, ya que únicamente se tiene la comercialización de un solo producto y los costos de operación y producción podrían ser demasiados caros, por lo que el retorno de la inversión tendería en resultados negativos. Otros ejemplos hoy en día son aquellos que procesan papel y granos de maíz para las plantas de etanol.
2. Biorrefinería de segunda fase: una sola materia prima, múltiples procesos y múltiples productos de salida. Son aptas para producir varios productos finales (energía, químicos y materiales) y pueden, por lo tanto, responder a la demanda del mercado, precios, obligaciones de contrataciones y los límites operativos de la planta. Estudios recientes han encontrado que una biorrefinería integrando la oferta de biocombustibles y químicos ofrecen un mayor retorno de la inversión y cumplen con las metas económicas y de energía simultáneamente.<sup>42</sup> Últimamente, toda biorrefinería de primera fase puede convertirse en una biorrefinería de segunda fase si se pudieran identificar los métodos de actualización de los diversos flujos. Por ejemplo, una biorrefinería de primera fase donde se procesa biodiesel podría ser convertida en una de segunda fase si el operador comenzara en convertir el glicerol (crudo) en productos químicos o energéticos de valor. De hecho, se reconoce que la generación de energía o biocombustible probablemente forman la columna vertebral inicial de numerosas biorrefinerías de segunda fase.<sup>39</sup>

---

3. Biorrefinería de tercera fase: múltiples materias primas, múltiples procesos y múltiples productos de salida. La tercera fase corresponde al más avanzado (desarrollado) tipo de biorrefinería. No solamente son capaces para producir una variedad de productos químicos o energéticos (como de igual manera lo hacen las biorrefinerías de segunda fase), también puede usar varios tipos de materia prima y tecnologías de procesamiento para producir múltiples productos que la sociedad demanda. La variedad de productos da un alto grado de flexibilidad para adaptarse a la demanda del mercado, y, además, provee a la biorrefinería de tercera fase varias opciones para alcanzar la ganancia y maximizar los ingresos. Adicionalmente, su múltiple entrada de materia prima ayuda en asegurar la disponibilidad de esta misma y ofrece la posibilidad de múltiples selecciones de materia prima para tener la mayor ganancia.<sup>43,44</sup>

Actualmente, existen cinco sistemas de biorrefinerías de tercera fase que están siendo analizadas en investigaciones y en desarrollo:<sup>3</sup>

1. Biorrefinería de cultivo integral. Utiliza cereales (por ejemplo, trigo, maíz, colza, etc.) y convierte toda la planta (paja y grano) en energía, productos químicos y materiales.
2. Biorrefinería verde. Esta es otro tipo de biorrefinería de tercera fase la cual ha sido muy estudiado en la Unión Europea (especialmente Alemania, Austria y Dinamarca) en los últimos 10-20 años.<sup>45,46</sup> Usa biomasa verde (como hierba verde, alfalfa, trébol, cereales inmaduros, etc.) y la convierte en productos útiles que incluyen energía, productos químicos y materiales mediante el uso de diferentes tecnologías, incluida la fermentación.
3. Biorrefinería de dos plataformas. Usa dos "plataformas" diferentes: una "plataforma de azúcar", que hace uso de la fermentación de azúcares extraídos de las materias primas de biomasa, y la "plataforma de gas de síntesis", que se basa en procesos de conversión termoquímicos y la cual se centra en la gasificación de materias primas de biomasa y subproductos de los procesos de conversión. La última plataforma puede transformar la biomasa en productos químicos intermedios gaseosos o líquidos que se pueden actualizar a combustibles de transporte, así como a productos químicos.<sup>47</sup>

4. Biorrefinería marina. Existe un considerable interés en el uso de micro y macroalgas (algas) como materia prima de biorrefinería para producir alimentos, biocombustibles y productos químicos. Aunque su potencial es considerable, las biorrefinerías marinas están en su infancia en comparación con los otros tipos de biorrefinerías de fase III (basadas en cultivos terrestres).<sup>48</sup>

5. Biorrefinería de lignocelulosa como materia prima. Este tipo de biorrefinería típicamente usará biomasa lignocelulósica tal como madera o paja. El material crudo lignocelulósico (el cual consiste principalmente de polisacáridos y lignina) entrará a la biorrefinería, y a través de un conjunto de procesos será fraccionado y convertido en una variedad de productos químicos y energéticos.

Dado que la presente investigación se enfoca principalmente a desechos biológicos con alto contenido lignocelulósico, a continuación se hace énfasis de este tipo de biorrefinerías.

### 2.1.3. Biorrefinería de lignocelulosa como materia prima

La lignocelulosa como materia cruda (consiste principalmente de polisacáridos y lignina) que entrará a la biorrefinería, y, a través de un arreglo de procesos, será fraccionado y convertido en una variedad de productos químicos y energéticos (Figura 2.2).

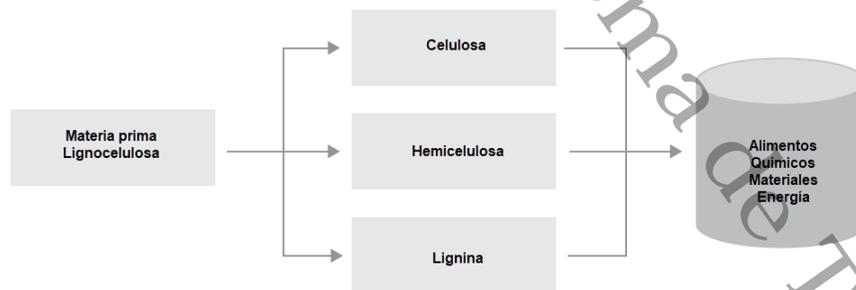


Figura 2.2: Diagrama simplificado de una biorrefinería con lignocelulosa como materia prima. Adaptado del trabajo de Clark and Deswarte<sup>3</sup>.

Un ejemplo inminente de este tipo de biorrefinerías es SP Processum en Suiza, el cual corresponde a un clúster integrado de industrias convirtiendo madera en energía, químicos y materiales (Figura 2.3). Este es probablemente uno de los mejores ejemplos de simbiosis industrial en el mundo, con una industria usando el desecho o productos derivados de otro como materia cruda.<sup>4</sup>

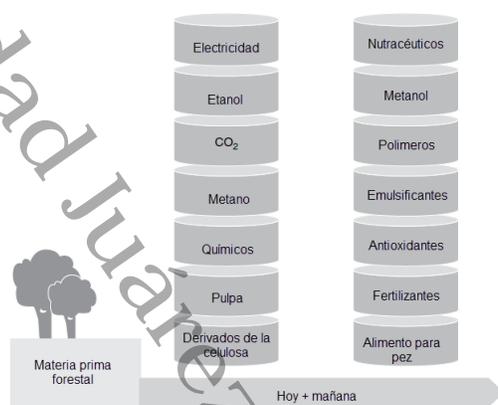


Figura 2.3: Ejemplo del proceso de una biorrefinería en Suiza con lignocelulosa como materia prima. Adaptado del trabajo de Gravitis<sup>4</sup>.

Una biorrefinería de materia prima de segunda generación, generalmente es considerada prometedora debido a la alta disponibilidad de biomasa, por lo que el costo de este tipo de biorrefinería es relativamente bajo y tiene un alto potencial de sostenibilidad.<sup>49</sup> Por lo que en la Tabla 2.1 se muestra cada una de los tipos (generaciones) de biorrefinerías existentes, y la materia prima usada en cada una de ellas.

Tabla 2.1: Clasificación de tipos de biorrefinerías de acuerdo con el tipo de materia prima.

Tipo de biorrefinería	Materia Prima	Referencias
Primera Generación	Uso de cosechas para la producción de biocombustible: granos de maíz, caña de azúcar, etc.	Kadam et al. <sup>50</sup> Kamm and Kamm <sup>51</sup> Sánchez and Cardona <sup>52</sup> Cherubini <sup>40</sup>

Tabla 2.1 continúa de la página anterior

Tipo de biorrefinería	Materia Prima	Referencias
Segunda Generación	Uso de residuos municipales, residuos agroindustriales, desechos biológicos, para la producción de biocombustible.	Cherubini and Ulgiati <sup>53</sup> Qureshi et al. <sup>54</sup>
Tercera Generación	Uso de las algas para la producción de biocombustible.	Harun et al. <sup>55</sup> Scott et al. <sup>56</sup> Jaramillo et al. <sup>57</sup> Sánchez-Tuirán et al. <sup>58</sup> Jonker and Faaij <sup>59</sup>

#### 2.1.4. Retos y oportunidades

Los productos de una biorrefinería (energía, productos químicos y materiales) inevitablemente tendrán que competir con los productos derivados del petróleo existentes y futuros. Como se ve en la Tabla 2.2, los dos tipos de refinerías muestran destacables diferencias, lo cual se traduce a un número de retos y oportunidades para el rápido despliegue de las biorrefinerías.

Tabla 2.2: Comparación de una petro-refinería con una biorrefinería.<sup>60</sup>

	Petro-refinería	Biorrefinería
Materia prima		
Locación	Ricos depósitos en algunas áreas	Ampliamente distribuidas
Densidad	Alta	Baja
Disponibilidad	Continúo, pero finito	Temporal, pero renovable
Composición química	Hidrocarburos; no funcionales	Altamente funcionales y oxigenadas
Proceso de conversión		

Tabla 2.2 continúa de la página anterior

	Petro-refinería	Biorrefinería
	Probado por más de 100 años	Requiere de más desarrollo y nuevas tecnologías
Productos	En el mercado y con las máximas especificaciones	La calidad necesita ser estandarizada

### 2.1.5. Productos

Actualmente, hay una serie de factores que están llevando al desarrollo y comercialización de bio-productos. Estos incluyen: el alto precio del petróleo, preferencias del consumidor y el compromiso de las corporaciones para productos sustentables, y las leyes gubernamentales para el soporte en una bio-economía.<sup>61</sup>

Sin embargo, un precio competitivo y un desempeño superior o igual comparado con sus contrapartes (productos hechos a partir de recursos fósiles) son el centro de la viabilidad de los bio-productos. A pesar de que algunos bio-plásticos son competitivos en costos, la mayoría son de 2 a 4 veces más caros que el plástico convencional, limitando su aceptación hasta la fecha.<sup>62</sup> Algo muy importante, las biorrefinerías no deberían de limitarse así mismas para la producción de productos existentes, pero sí deberían enfocarse al desarrollo de nuevos grupos de productos tomando ventaja de las propiedades intrínsecas de la biomasa (la disponibilidad y el potencial energético) y sus componentes.<sup>38</sup>

Un problema importante para la biomasa como materia prima para la fabricación de productos industriales es la variabilidad. Por lo tanto, es necesario establecer estándares y certificaciones a medida que nuevos biocombustibles, biomateriales y bio-productos se introduzcan en el mercado para asegurar a los usuarios finales la calidad de un producto de base biológica, su rendimiento y su contenido de base biológica.

---

También se necesita un marco regulatorio y de políticas seguro y de largo plazo para brindar certeza a las compañías e inversionistas que buscan explotar la biomasa/residuos biológicos como materia prima. Al igual que con muchas industrias emergentes, se requerirán nuevos incentivos para estimular la aceptación del mercado y atraer la inversión privada necesaria requerida en el desarrollo de nuevos productos de base biológica y el despliegue a gran escala de las biorrefinerías integradas.<sup>41,42</sup>

Uno de los principales impulsores para el uso de productos de origen biológico (energía, productos químicos y materiales) son sus beneficios ambientales potenciales en comparación con los productos derivados del petróleo (por ejemplo, reducción de emisiones de dióxido de carbono, biodegradabilidad). Por lo tanto, es esencial que se evalúe el impacto ambiental de toda la energía y los productos químicos fabricados por las biorrefinerías (a lo largo de su ciclo de vida) para asegurarnos de que sean verdaderamente sostenibles y representen ventajas reales (ambientales y sociales) en comparación con sus análogos derivados del petróleo.<sup>63</sup>

## **2.2. La sustentabilidad**

La sustentabilidad se relaciona con la calidad de vida de una comunidad, toda vez que los sistemas económicos, sociales y ambientales que constituyen la comunidad también contribuyan a mantener un nivel significativo de salud y capacidad productiva para los habitantes tanto presentes como futuros.<sup>64</sup>

Cuando a la sociedad, a la economía y al medio ambiente se les ve como entidades separadas, como partes no relacionadas de la comunidad, los problemas también se ven como tópicos aislados. Con base en este paradigma, cada entidad pública va por su lado, los consejos para el desarrollo económico tratan de crear empleos. La seguridad social se enfoca hacia los servicios del cuidado de la salud y la vivienda. Las oficinas del medio ambiente tratan de prevenir y corregir los problemas de la contaminación. Este enfoque, poco sistemático, puede generar un número

---

importante de efectos colaterales negativos.

En lugar de continuar con el enfoque no sistemático, lo que se requiere es un punto de vista en el que la comunidad tome en cuenta las relaciones entre la economía, el medio ambiente y la sociedad, como se muestra en la Figura 2.4.

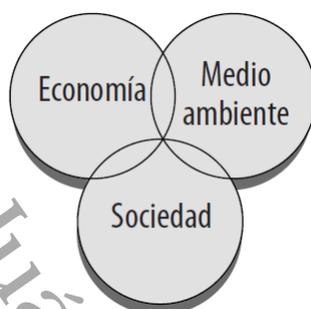


Figura 2.4: La comunidad relacionada en sus tres partes.<sup>5</sup>

En síntesis, el medio ambiente envuelve a la sociedad. Desde los primeros tiempos de la historia humana, el ambiente ha determinado el tipo de sociedad. Actualmente, lo opuesto es cierto: la actividad humana está rediseñando el medio ambiente en una tasa siempre creciente. Las partes que no han sido afectadas son cada vez más pequeñas. Dado que la gente necesita alimentos, agua y aire para sobrevivir, la sociedad no debe explotar de más el medio ambiente y sus recursos naturales.

### **2.2.1. Dimensión social**

La dimensión social del desarrollo sustentable consiste en reconocer el derecho a un acceso equitativo a los bienes comunes para todos los seres humanos, en términos intrageneracionales e intergeneracionales, tanto entre géneros como entre culturas. La dimensión social no solo se refiere a la distribución espacial de la población, sino que remite, de manera especial, al conjunto de relaciones sociales y económicas que se establecen en cualquier sociedad y que tienen como base la religión, la ética y la propia cultura. Asimismo, esta dimensión tiene como referente obligatorio a la

---

población, y presta especial atención a sus formas de organización y de participación en la toma de decisiones. También se refiere a las interacciones entre la sociedad civil y el sector público.

### **2.2.2. Dimensión económica**

La dimensión económica del desarrollo sustentable se centra en mantener el proceso de desarrollo económico por vías óptimas hacia la maximización del bienestar humano, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la disponibilidad del capital natural.<sup>65</sup> En esta perspectiva económica se piensa en los factores como aspectos complementarios, más que como sustitutos. Apelar a la complementariedad se hace en el sentido de un factor limitante. Un factor se vuelve limitante cuando un incremento en el (los) otro(s) factor(es) no incrementa el producto, pero un incremento en el factor en cuestión (el limitante) va a incrementar el producto.<sup>66</sup>

### **2.2.3. Dimensión ambiental**

Esta dimensión surge del postulado que afirma que el futuro del desarrollo depende de la capacidad que tengan los actores institucionales y los agentes económicos para conocer y manejar, según una perspectiva de largo plazo, su reserva de recursos naturales renovables y su medio ambiente. En esta dimensión se presta especial atención a la biodiversidad y, principalmente, a los recursos como el suelo, el agua y la cobertura vegetal (bosque), que son los factores que en un plazo menor determinan la capacidad productiva de determinados espacios.<sup>67</sup>

En términos ecológicos, el desarrollo sustentable supone que la economía sea circular, que se produzca un cierre de los ciclos, tratando de imitar a la naturaleza. Es decir, los sistemas productivos son diseñados para utilizar únicamente recursos y energías renovables, para no producir residuos, ya que éstos vuelven a la naturaleza o se convierten en entrada de otro producto manufacturado. Este modelo opera considerando el ciclo vital del producto completo, desde su extracción hasta la

---

disposición final del residuo cuando su vida útil termina. Este intervalo se divide en tres etapas: la primera consiste en aplicar el principio de “quien contamina paga” a la hora de fijar los precios. La segunda es la elección informada del consumidor mediante el etiquetado, y la tercera se refiere al diseño ecológico del producto, para lo cual se aplican las herramientas Inventarios del Ciclo de Vida (ICV) y el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).<sup>68</sup>

### 2.3. El Análisis de Ciclo de Vida

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la gestión ambiental. Los estándares ISO-14040 se refieren de manera particular al ACV.<sup>6</sup> Esta norma establece que: *“El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”*.

En la primera década del siglo XXI las acciones están concentradas en la aplicación generalizada de las técnicas, mediante la gestión del ciclo de vida de los productos. Un ejemplo de este esfuerzo es el programa Iniciativa del Ciclo de Vida por un mundo sostenible (Life Cycle Initiative)<sup>69</sup>, cuya meta es “desarrollar y difundir herramientas prácticas para evaluar las oportunidades, riesgos y compensaciones, asociados a los productos y servicios durante todas las etapas del ciclo de vida”. Según la SETAC y de acuerdo con la ISO-14040, el ACV se compone de cuatro fases (Figura 2.5):

Estas cuatro fases son un modelo de simulación estático en el que cada unidad del proceso (producción, transporte, etc.) tiene, por un lado, entradas: recursos, emisiones y cambios medioambientales. Por el otro, tiene flujos de productos intermedios-relacionados con las unidades de proceso. Se trata de flujos

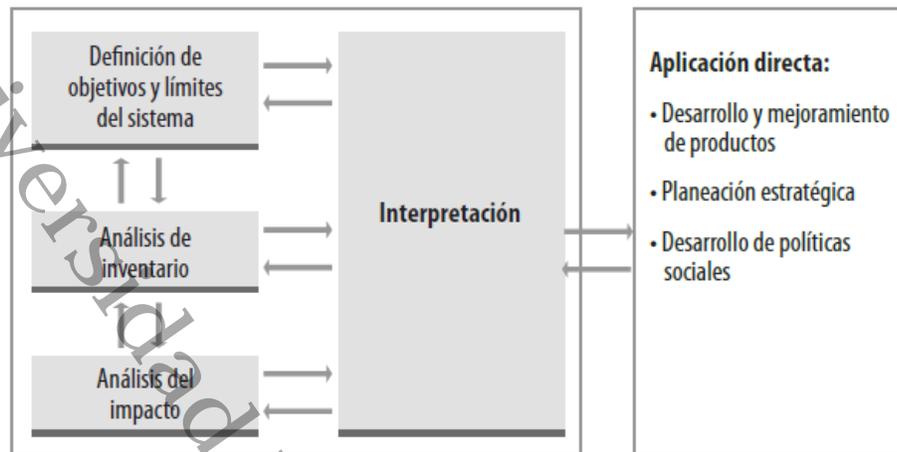


Figura 2.5: Fases de un ACV, de acuerdo con la serie de normas ISO-14040.<sup>6</sup>

de referencia, que son las cantidades específicas de flujos de producto para cada uno de los sistemas comparados que se requieren para producir una unidad de la función. El flujo de referencia se convierte en el punto de partida para construir los modelos necesarios de los sistemas de producto.

En la Figura 2.6 se ilustra un esquema más explícito que representa el ACV. Esta representación, proporciona los elementos generales de análisis para que las empresas definan los límites ambientales de sus procesos y tengan elementos que justifiquen las mejoras tecnológica (LA).

Además, en la Figura 2.6 se tiene la intención de sugerir que el ACV se desarrolla mediante un análisis multicriterio y no de un análisis basado en un único punto de vista que, evidentemente, sería escogido según lo que más le convenga al que pidiera la evaluación. Efectivamente, no se consideran sólo los diferentes impactos medioambientales, también se mide la entrada de materias primas y el consumo de energía. La visión, pues, no se reduce a la cuestión de la contaminación, sino que se extiende a la gestión de recursos, sin perder de vista en el objetivo central, que es el desarrollo sustentable.

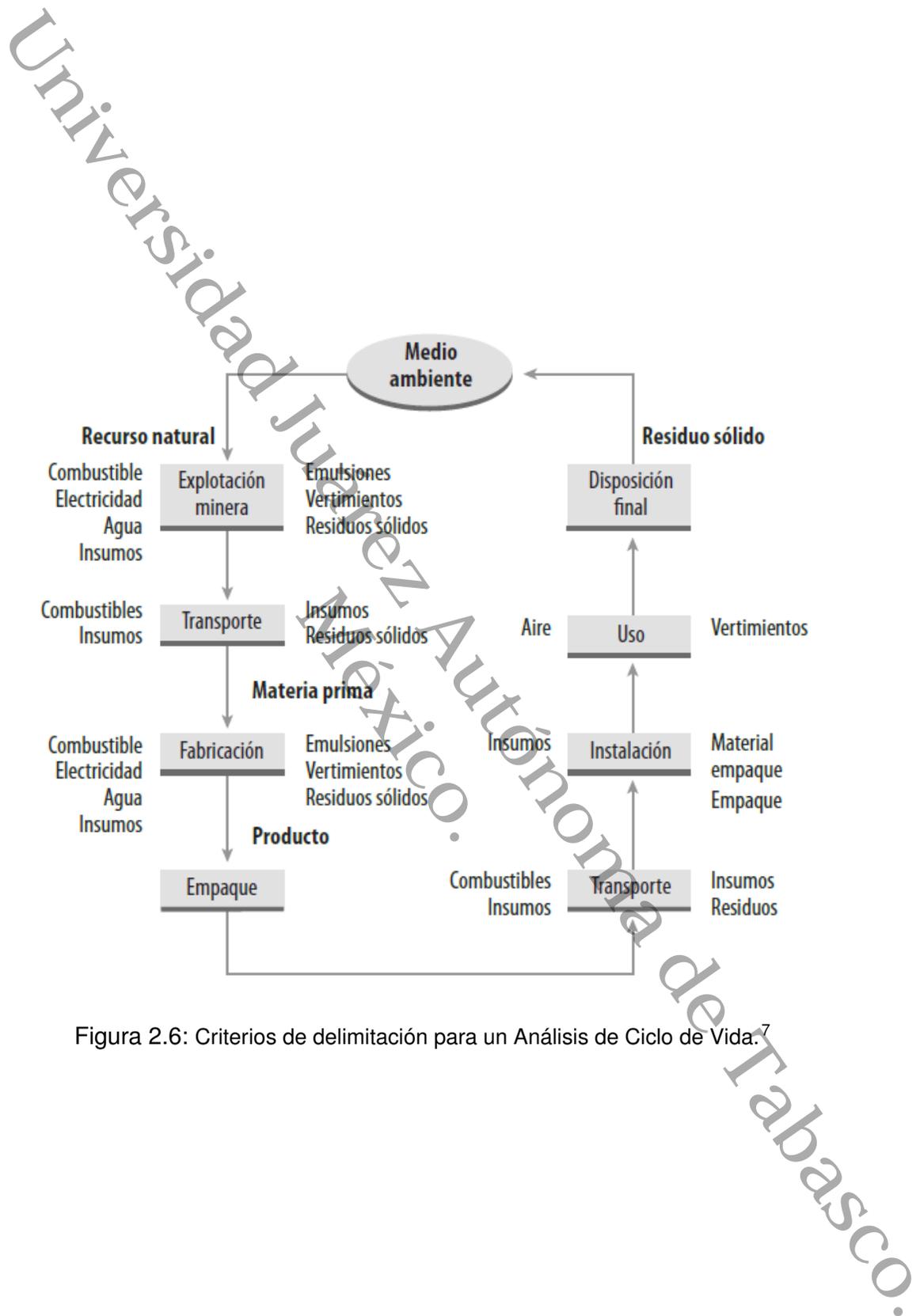


Figura 2.6: Criterios de delimitación para un Análisis de Ciclo de Vida.<sup>7</sup>

### 3 | Metodología

En la Tabla 3.1 se muestran las posibles fuentes de biomasa con potencial para la generación de biocombustibles que se pueden encontrar en un ingenio azucarero.

Tabla 3.1: Tipos de desechos de un ingenio azucarero y el uso de cada uno de ellos. Fuente propia.

Fuente de biomasa	Uso
Cachaza	Abono para los cultivos de caña. Se vende directamente a los productores.
Condensados	El agua es tratada en una planta tratamiento de agua y después es enviada a un tanque de almacenamiento para su posterior uso en calderas y servicios generales.
Aguas residuales	Se usa para agua de inyección a fábrica para los tachos (continuos y batch).
Melaza	Alimento para ganado. Se vende directamente a los ganaderos y diversas empresas que se encargan de la venta de la melaza.
Bagazo	Se usa como combustible para las calderas para la generación de vapor y energía a la fábrica. El excedente se envía directo al "patio de bagazo". Algunos ingenios venden y/o utilizan el bagazo para la fabricación de papel.

De la Tabla 3.1, se puede ver que el bagazo tiene potencial de alta disponibilidad (ya que en un ingenio se tiene un excedente que es almacenado) y por ser un material

---

lignocelulósico, se es capaz de obtener bicomcombustibles. En cuanto a las otras fuentes de biomasa, estas podrían tener potencial para la producción de biocombustible, sin embargo, el producir biocombustibles de estas fuentes es menos redituable que el venderlas directamente al mercado sin que sufran otro tipo de proceso.

### 3.1. Determinación del excedente de bagazo en un ingenio azucarero

Un ingenio azucarero cuenta con una capacidad de molienda al día ( $CMD$ ), la cual se refiere a la cantidad de caña que procesa durante 24 h, este parámetro se define en la Ec. 3.1, donde  $CMH$  se refiere a la cantidad de caña molida por hora.

$$CMD = CMH \times 24 \text{ h [t]} \quad (3.1)$$

La caña que llega al ingenio es preparada por un conjunto de equipos: picadora, desfibradora, niveladora, para luego pasar por el proceso de molienda. En este proceso de molienda se cuenta con conjunto de molinos, los cuales están encargados de extraer el jugo de la caña de azúcar, el cual es enviado a la fábrica para el proceso de elaboración de azúcar. Por otra parte, del mismo proceso de molienda se obtiene un sub-producto conocido como bagazo. La cantidad de bagazo está dada por la relación de la cantidad de fibra en caña ( $CFC$ ), con la cual se puede definir la cantidad de bagazo obtenido de los molinos ( $CBC$ ), tal y como se define en la Ec. 3.2.

$$CBC = CMH \times CFC \text{ [t} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.2)$$

El funcionamiento y proceso de producción de un ingenio se debe principalmente a que en él se cuenta con una planta eléctrica y equipos que requieren vapor. Este vapor, el cual se nombrará generación de vapor por hora ( $GVH$ ), está relacionado con la cantidad de caña molida por hora ( $CMH$ ) y la relación de vapor por agua evaporada ( $RVAE$ ), por lo que se puede definir  $GVH$  en la Ec. 3.3.

$$GVH = RVAE \times CMH [t \cdot h^{-1}] \quad (3.3)$$

El bagazo tiene un poder calorífico ( $PC$ ), que de acuerdo con el "Manual para el Ingeniero Azucarero"<sup>70</sup>, el cual se calcula con la Ec. 3.4. Donde  $HB$  se refiere a la humedad del bagazo,  $PDBC$  es el porcentaje de basura en caña, la cual en la misma Ec. 3.4 se desprecia, ya que esta no forma parte de la fibra, sino que son otros componentes como hojas secas, basura que proviene del campo, entre otros.

$$PC = [4250 - 4850 HB] (1 - PDBC) [kcal \cdot kg^{-1}] \quad (3.4)$$

Para tener una correcta combustión de bagazo en la caldera, es fundamental tener una adecuada cantidad de aire primario ( $CAP$ ) necesario para la combustión, la cual se define en la Ec. 3.5.

$$CAP = \frac{2.38 EAT + 2.7045}{1.293} + 2.38 (1 - HB) \dots \quad (3.5)$$

$$\times CEG \times CBC \times 1000 \times VEA [kg \cdot h^{-1}]$$

De la Ec. 3.5,  $EAT$  es el exceso de aire teórico (Ec. 3.6),  $CEG$  es el coeficiente de expansión de gas (Ec. 3.7) y  $VEA$  es el volumen específico del aire a temperatura ambiente.

$$EAT = \frac{(O_2 - \frac{CO}{2})}{(0.27 N_2) - (O_2 - \frac{CO}{2})} [\%] \quad (3.6)$$

$$CEG = 1 + EAT \quad (3.7)$$

En la Ec. 3.6, las cantidades de oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno, son porcentajes teóricos mencionados en el "Manual para el Ingeniero Azucarero"<sup>70</sup>.

En el diseño de una caldera, se tiene la sumatoria de aire teórico ( $SAT$ ) la cual se muestra en la Ec. 3.8, donde  $AS$  es el aire secundario suministrado por un ventilador (Ec. 3.9) y  $FT$  es el flujo de aire teórico (Ec. 3.10).

$$SAT = AS + FT + CAP \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.8)$$

$$AS = GS - CAP \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.9)$$

$$FT = \frac{FED}{VEA} \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.10)$$

En la Ec. 3.9,  $GS$  se refiere a los gases de salida que emiten las calderas por las chimeneas una vez que el bagazo ha hecho combustión en ellas, los cuales son calculados en la Ec. 3.11.  $TGC$  es la temperatura de los gases a chimenea.

$$GS = \frac{2.38 EAT + 2.7045}{1.293} \left( 1 + \frac{TGC}{273} \right) \times 1000 \times CBC \times VEA \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.11)$$

En la Ec. 3.10  $FED$  es el flujo de diseño el cual está definido en la Ec. 3.12.  $MCCF$  se refiere a la máxima capacidad de caña que la fábrica puede procesar por día.

$$FED = 0.0283 MCCF \times 60 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (3.12)$$

En la Ec. 3.13 se describe la eficiencia térmica de la caldera ( $ETC$ ).  $EV$  y  $EA$  se refieren a la entalpía del vapor y a la entalpía del agua, respectivamente.  $TA$  se refiere a la temperatura ambiente.

$$ETC = \frac{(1000 GVH) (EV - EA)}{[(1000 GVH) (EV - EA)] + [(0.85 SAT) (TGC - TA)]} \quad (3.13)$$

De las ecuaciones anteriores, se puede definir la cantidad necesario de bagazo para generar vapor en las calderas ( $CNBGVC$ ), la cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$CNBVC = \frac{GVH \times (EV - EA)}{ETC \times PC} \quad (3.14)$$

Finalmente, se tiene una última ecuación (Ec. 3.15), la cual se refiere al bagazo residual. Este bagazo residual, es el bagazo no utilizado en la caldera para la generación de vapor para la fábrica.

$$BR = CBC - CNBGVC \text{ [t]} \quad (3.15)$$

En la Figura 3.1, se muestra un esquema general de las variables, a tal manera de especificar el flujo de molienda de la caña de azúcar hasta obtener el bagazo residual.

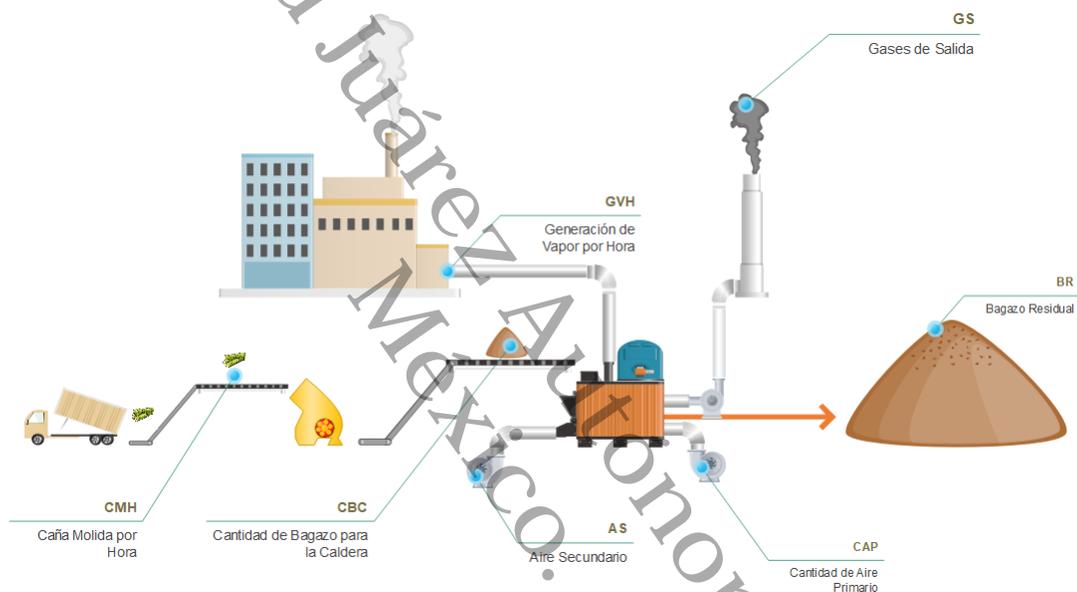


Figura 3.1: Esquema general de flujo de molienda de la caña de azúcar.

### 3.2. Definición del esquema de la biorrefinería

El esquema de la biorrefinería estará integrado a un ingenio azucarero, en donde se aprovechará el flujo de energía (vapor) y masa (bagazo residual) de la infraestructura ya existente. La Figura 3.2 muestra un esquema de un ingenio azucarero.

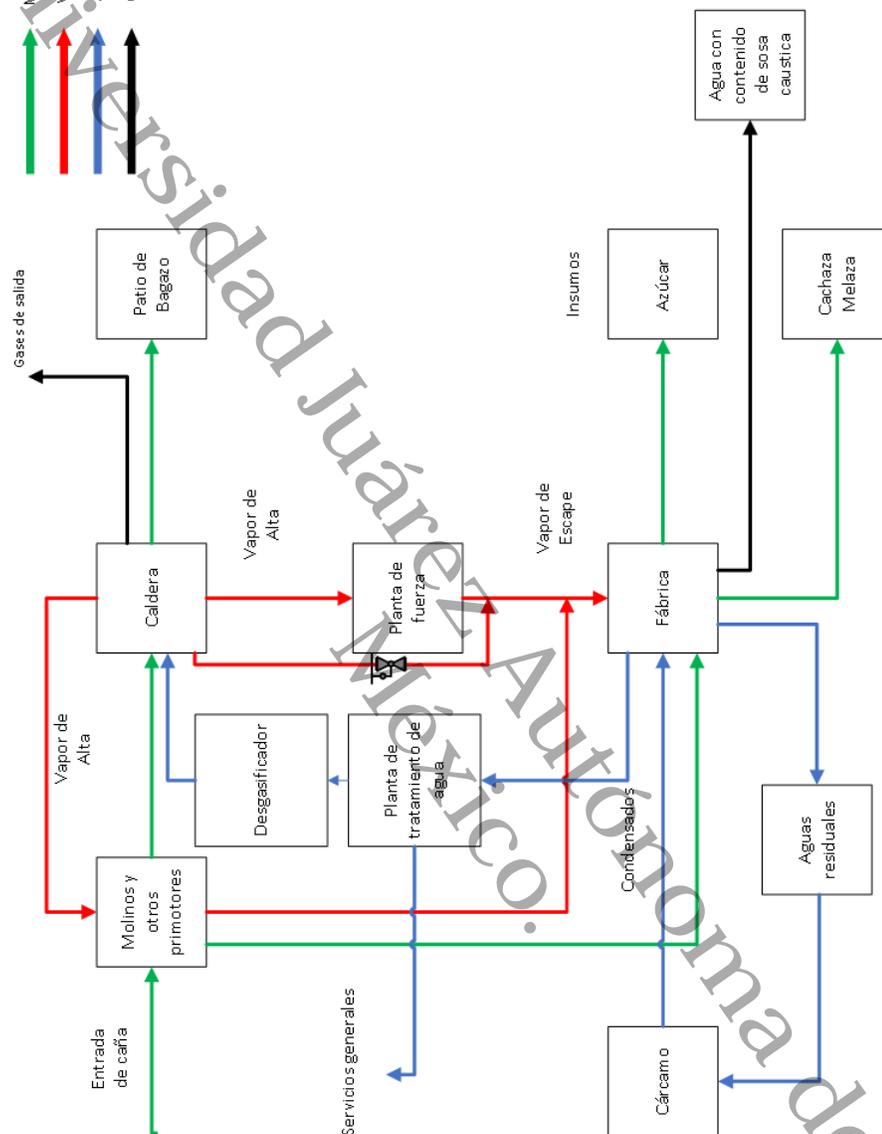


Figura 3.2: Esquema general de un ingenio azucarero.

Como se observa, existen sub-productos derivados de la caña de azúcar: bagazo, cachaza, melaza, entre otros, los cuales pueden ser aprovechados con la implementación de una biorrefinería para poder procesar estas materias primas.

Por lo tanto, en la Figura 3.3 con líneas punteadas, se muestra la integración de la biorrefinería al ingenio azucarero, para así aprovechar el bagazo residual (materia prima definida para el presente estudio).

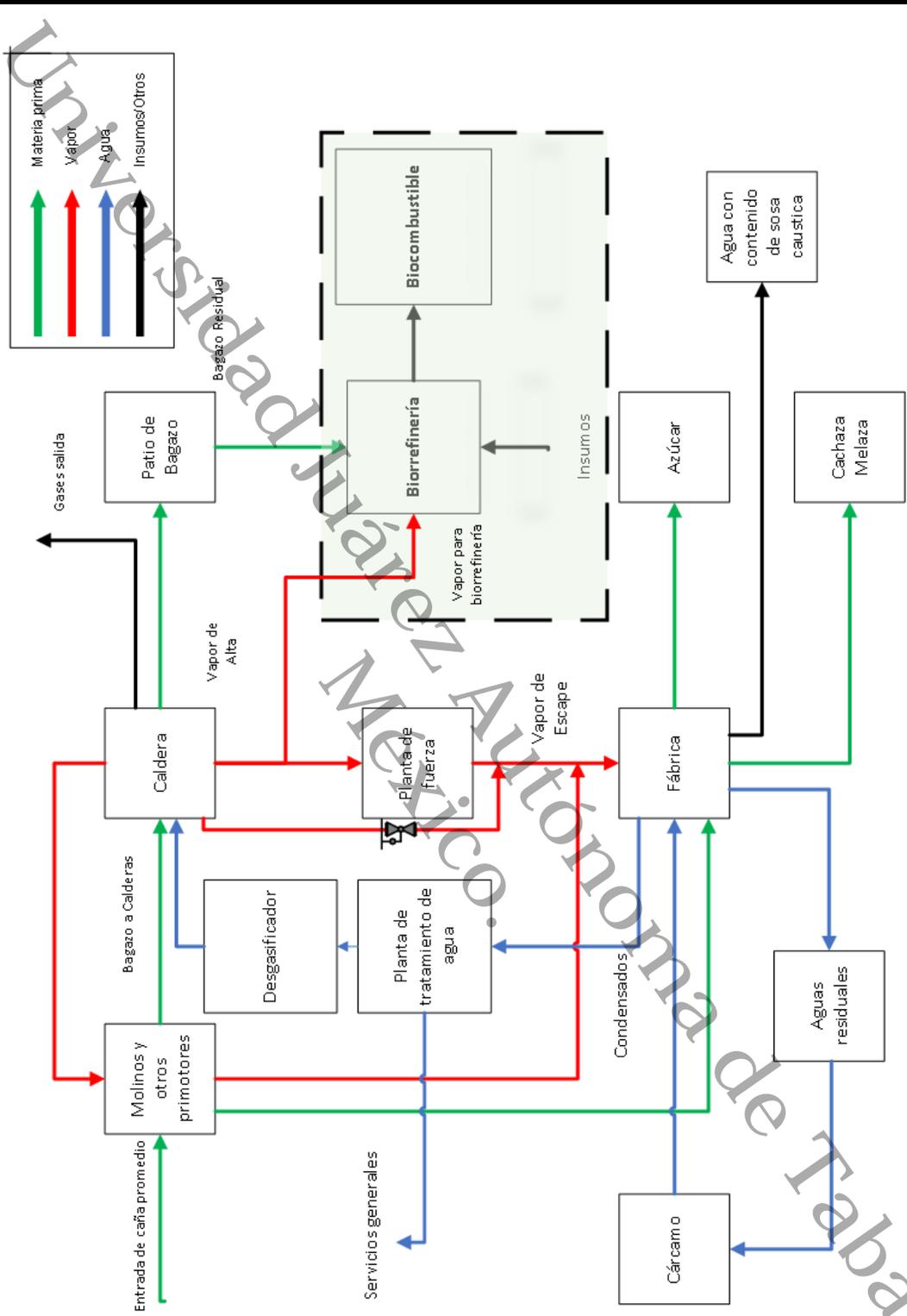


Figura 3.3: Esquema general de la biorrefinería integrada a un ingenio azucarero.

### 3.2.1. Equipamiento requerido para la biorrefinería

Para definir los equipos que constituirán la biorrefinería, se realizó una comparativa entre los diversos autores y las propuestas de biorrefinerías, la cual, dada la experimentación que realizó Ghosh et al.<sup>8</sup> se ha considerado la configuración de equipos para el estudio en mención. Cada sección que se muestra en la Figura 3.4 lo constituye un conjunto de equipos que se muestra en la Figura 3.4, los cuales se describen a continuación.

**Hidrólisis ácida (H-A).** En esta etapa (Figura 3.5) se encuentra un equipo digestor (DIGESTOR), en donde una cantidad de bagazo (BCA) es introducido, añadiendo ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a una concentración del 0.25 % v/v y una corriente de vapor (VAPOR) a 140 °C. El producto resultante (HIDRO) es enfriado (HIENFRE) por un intercambiador de calor (INTER1).

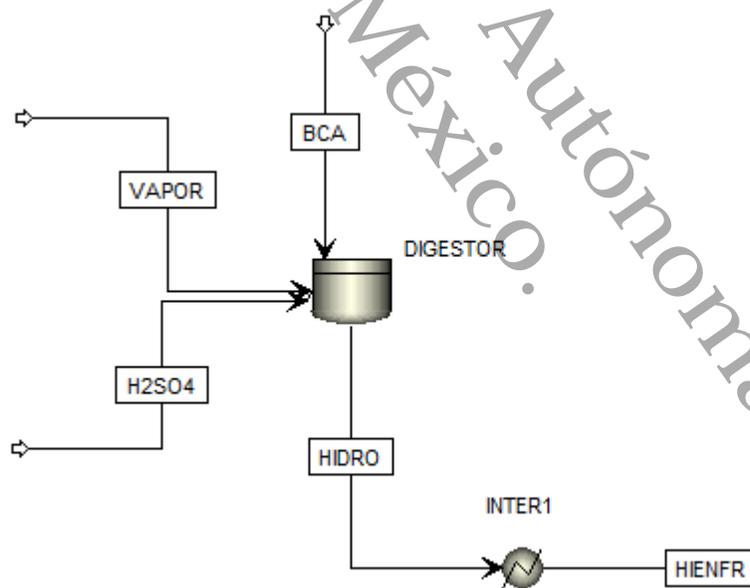


Figura 3.5: Etapa de hidrólisis ácida.

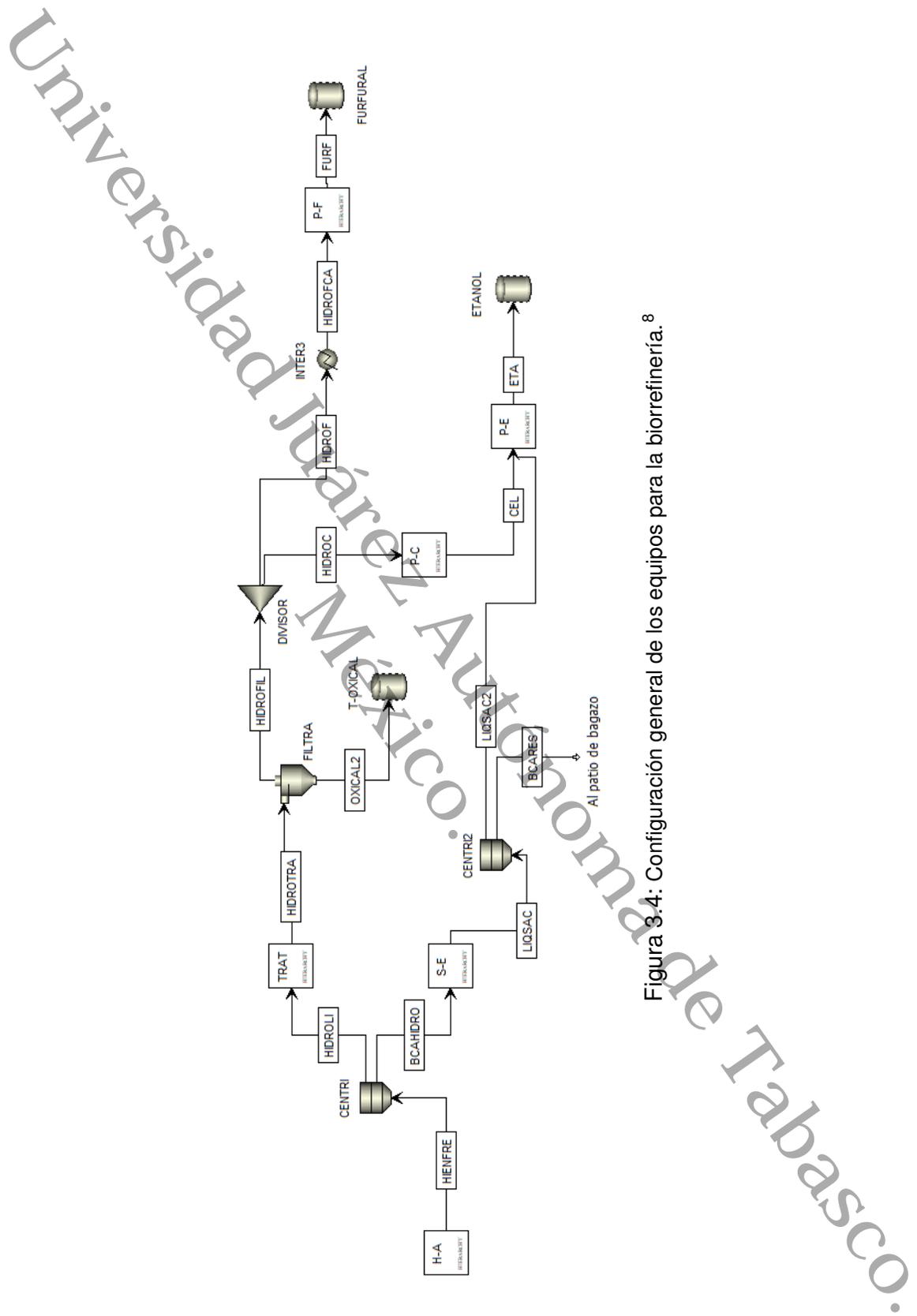


Figura 3.4: Configuración general de los equipos para la biorrefinería.<sup>8</sup>

---

El líquido hidrolizado enfriado (HIENFRE) pasa por un proceso de separación mecánica (CENTRI, ver Figura 3.4) en el cual se separa el bagazo hidrolizado (BCAHIDRO) del líquido hidrolizado (HIDROLI).

**Sacarificación enzimática (S-E).** El bagazo hidrolizado (BCAHIDRO) entra a un reactor (SACENZ) donde se añade polietilenglicol (PEG) y mezclas de enzima celulasa (ENZIMAS).

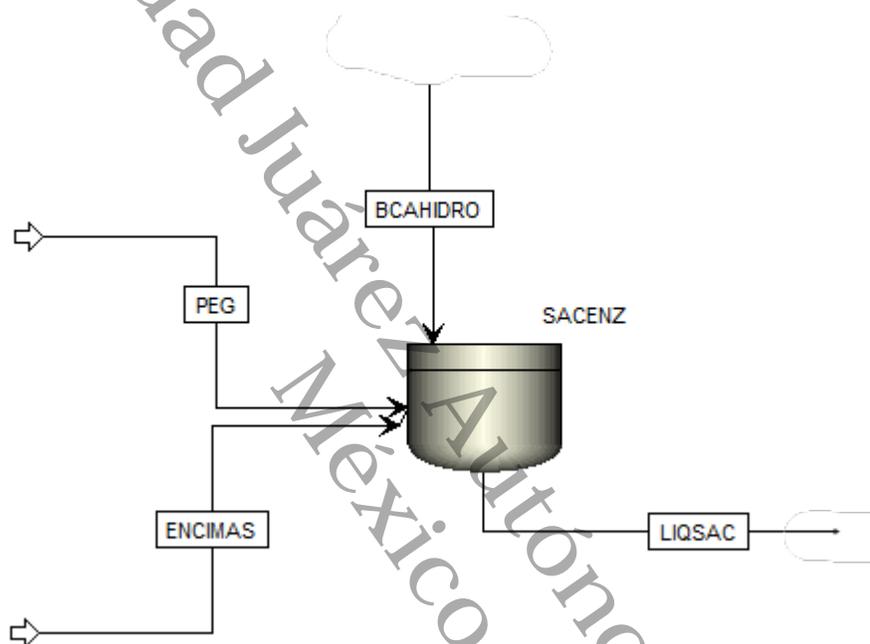


Figura 3.6: Etapa de sacarificación enzimática.

El producto resultante es un líquido sacarificado (LIQSAC), con una cantidad de bagazo, el cual es separado mediante separación mecánica (CENTRI2, ver Figura 3.4). Para el esquema propuesto de la biorrefinería, el bagazo resultante de esta separación (BCARES) es enviado a patio del ingenio azucarero.

**Tratamiento del líquido hidrolizado (TRAT).** En esta etapa el líquido hidrolizado (HIDROLI) que fue separado del bagazo hidrolizado (BCAHIDRO) es tratado con óxido de calcio (OXICAL) para incrementar su pH para su uso posterior.

El producto resultante es un líquido hidrolizado con un pH de 6 a 6.5 (HIDROTRA), el cual pasa por un proceso de filtración (FILTRA) mecánica, para separar la partículas

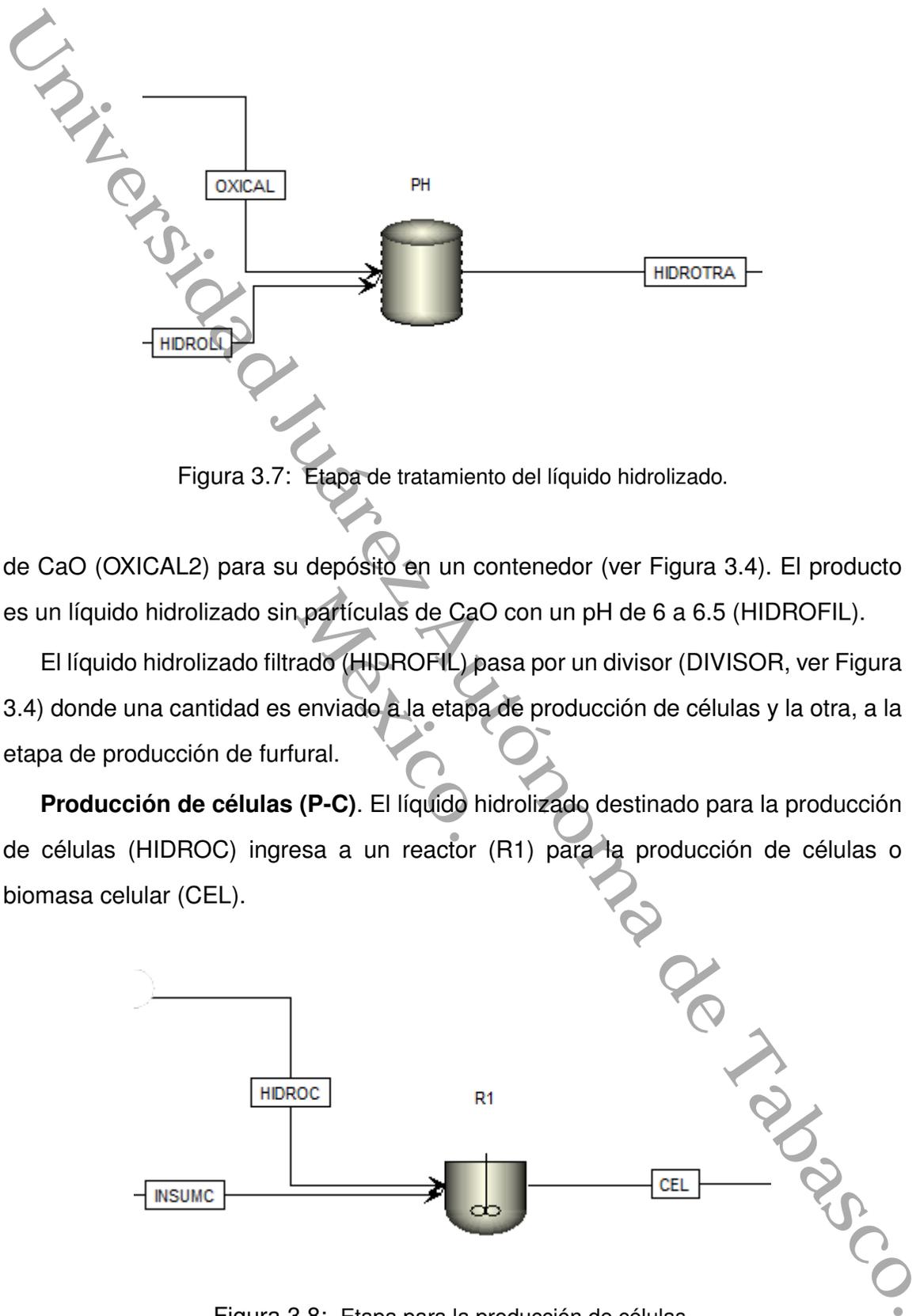


Figura 3.7: Etapa de tratamiento del líquido hidrolizado.

de CaO (OXICAL2) para su depósito en un contenedor (ver Figura 3.4). El producto es un líquido hidrolizado sin partículas de CaO con un pH de 6 a 6.5 (HIDROFIL).

El líquido hidrolizado filtrado (HIDROFIL) pasa por un divisor (DIVISOR, ver Figura 3.4) donde una cantidad es enviado a la etapa de producción de células y la otra, a la etapa de producción de furfural.

**Producción de células (P-C).** El líquido hidrolizado destinado para la producción de células (HIDROC) ingresa a un reactor (R1) para la producción de células o biomasa celular (CEL).

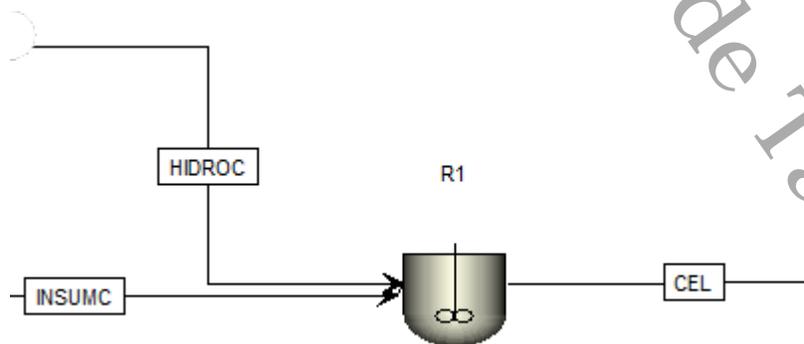


Figura 3.8: Etapa para la producción de células.

**Producción de etanol (P-E).** La biomasa celular (CEL) obtenida de la etapa de producción de células, es introducida a un reactor (R2), donde el líquido sacarificado (LIQSAC2, ver Figura 3.3) separado del bagazo (BCARES) proveniente de la etapa de sacarificación enzimática, es también introducido al reactor. El producto (DESTE) obtenido de esta etapa es enviado a una columna de destilación (CD1), en donde se obtiene el etanol (ETA).

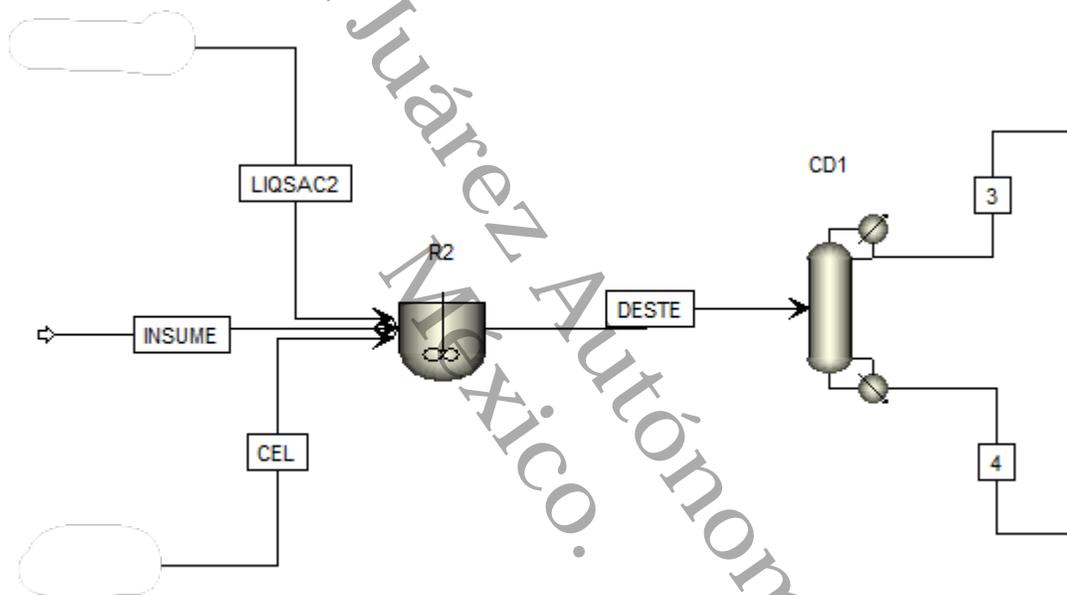


Figura 3.9: Etapa para la producción de etanol.

**Producción de furfural (P-F).** La otra cantidad del líquido hidrolizado tratado (HIDROF) es enfriado por un intercambiador de calor (INTER3) donde es enviado a un reactor en el cual se añade insumos (INSUMF) para la producción de furfural. El producto (DESTF) es enviado a una columna de destilación (CD2) para así obtener el furfural (FURF).

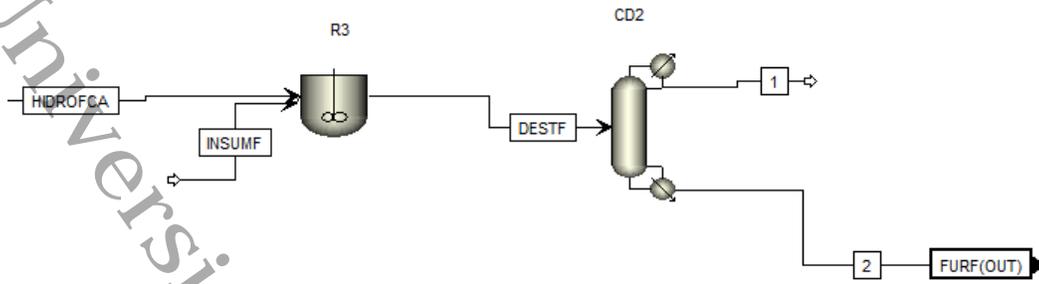


Figura 3.10: Etapa para la producción de furfural.

A lo largo de las etapas anteriores se tienen productos intermedios resultantes (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Productos obtenidos por etapas.<sup>8</sup>

Etapa	Producto
Hidrólisis ácida	Líquido hidrolizado Bagazo hidrolizado
Sacarificación enzimática	Líquido sacarificado Bagazo residual
Producción de células	Células
Producción de etanol	Etanol
Producción de furfural	Furfural

### 3.3. Análisis de sustentabilidad

Un análisis de sustentabilidad implica tres principales vertientes: ambiental, económico y social. Por lo tanto, en las siguientes secciones se describen los métodos utilizados para cumplir con cada una de ellas, y así, aplicar la metodología reportada por Sacramento-Rivero<sup>35</sup> y evaluar la sustentabilidad de la biorrefinería integrada al

ingenio.

### 3.3.1. Análisis del Ciclo de Vida

Para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del esquema de la Figura 3.3 se ha delimitado específicamente en las etapas (ver Figura 3.11) para su evaluación y aplicación de las metodologías pertinentes (Eco-Indicador 99 y CML-IA).

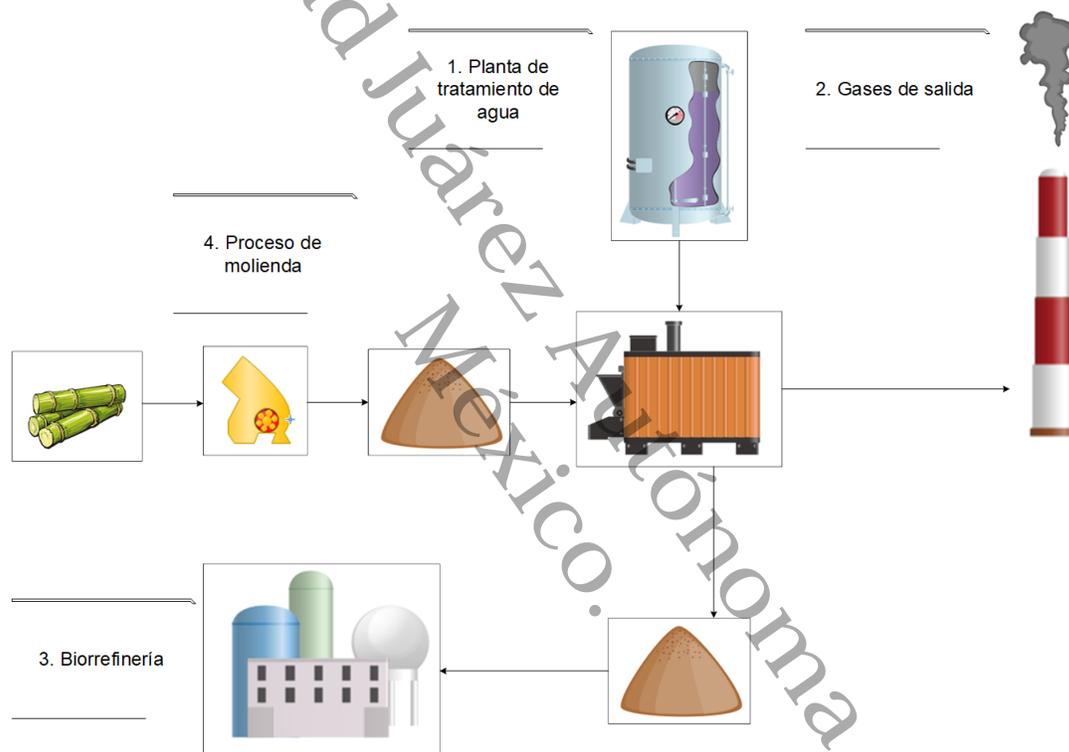


Figura 3.11: Delimitación del esquema de biorrefinería para el Análisis de Ciclo de Vida.

#### 3.3.1.1. Planta de tratamiento de agua

La planta de tratamiento de agua se ha considerado debido a que esta suministra a los domos de las calderas, el agua necesaria para la generación de vapor al ingenio; además, que de las calderas se obtendrá el vapor para la biorrefinería. Un esquema general de una planta de tratamiento de agua se muestra en la Figura 3.12. Dentro

de la etapa de pretratamiento del agua, se encuentran los procesos indicados en la Figura 3.13.

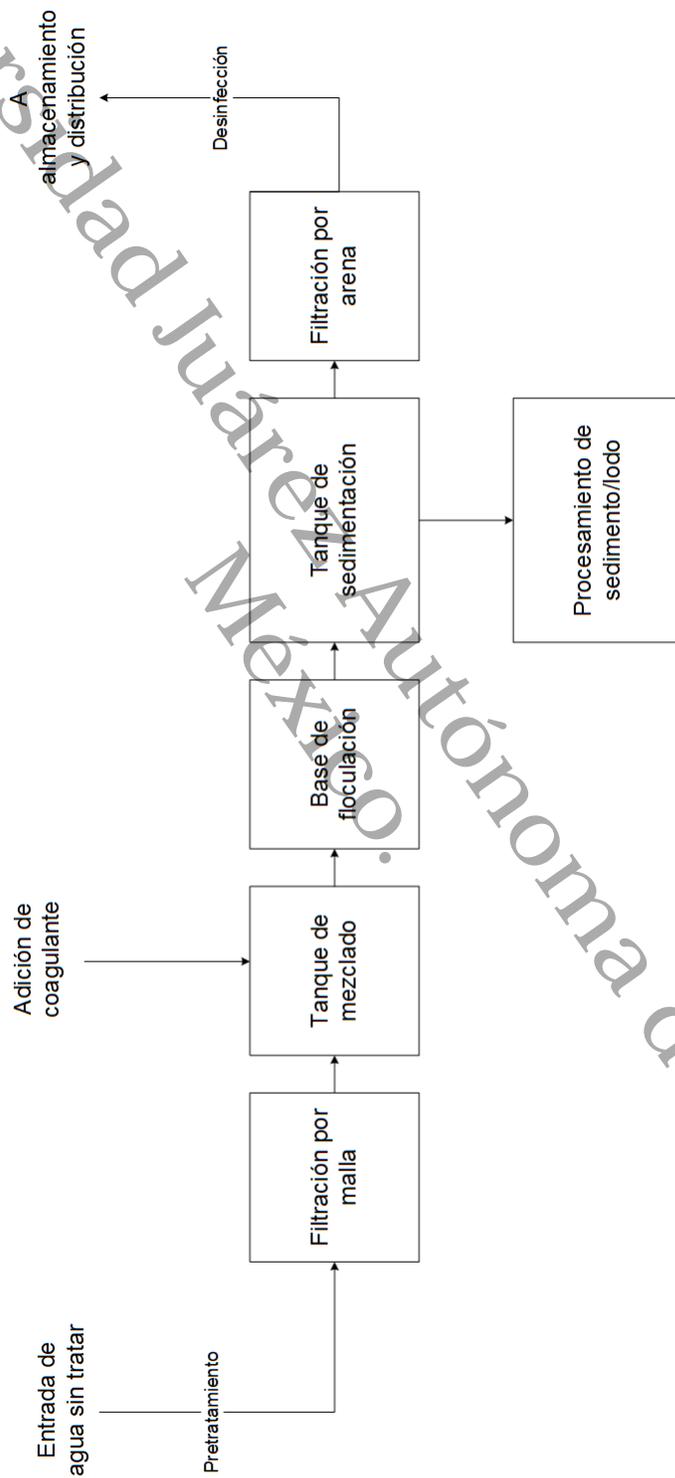


Figura 3.12: Esquema general de una planta de tratamiento de agua.

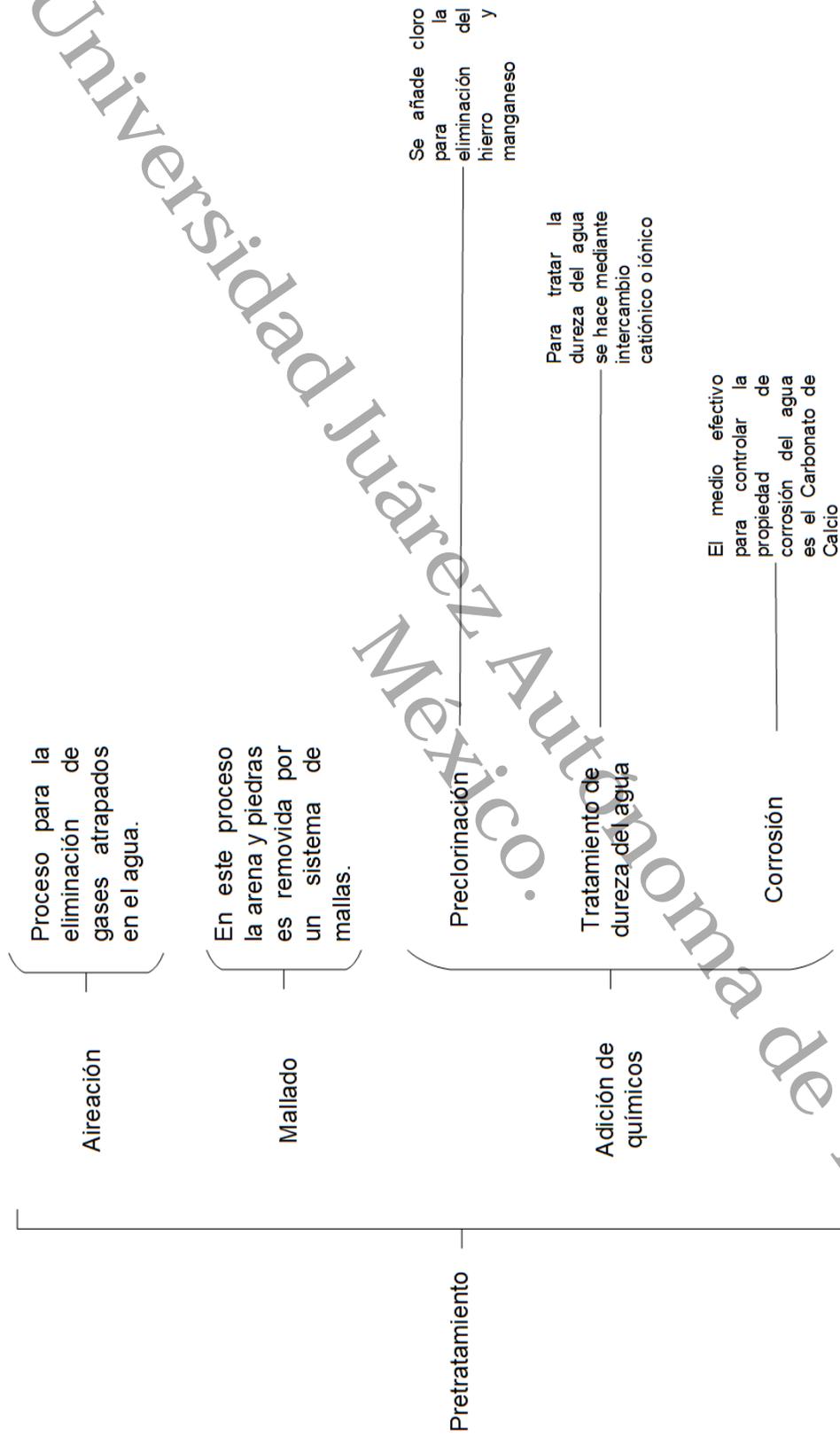


Figura 3.13: Principales procesos de la etapa de pretratamiento de agua.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

---

Continuando con el esquema general de la planta de tratamiento de agua, se tiene la etapa de coagulación, la cual se encarga de aglomerar los sedimentos que en la etapa de pretratamiento no se pudieron eliminar con el simple sistema de mallado. En esta etapa se agrega un agente coagulante, los cuales se mencionan a continuación entre los principales utilizados para esta etapa.

1. Sulfato de aluminio
2. Aluminato de sodio
3. Sulfato férrico
4. Sulfato de hierro
5. Cloruro férrico
6. Polímeros

Después de que se ha añadido el agente coagulante, pasa por la etapa de floculación, en donde se deja reaccionar el agua con dicho agente para que se formen los flóculos para su posterior eliminación en la etapa de sedimentación.

La penúltima etapa se refiere a un proceso de filtración por un sistema de filtros de arena, donde se eliminan aquellos flóculos que no lograron eliminarse en la etapa previa. Además, de eliminar aquellas partículas que han venido desde un principio del proceso del tratamiento del agua.

Por último, se tiene la etapa de desinfección, en donde se añade Cloro para – tal y como el nombre de la etapa lo indica – llevar a cabo el proceso de desinfección del agua.

#### **3.3.1.2. Gases de salida**

Como ya se planteó en el Capítulo 1, y, para llevar a cabo el Análisis del Ciclo de Vida, se ha tomado como base de la investigación el trabajo realizado por

Centeno-González et al.<sup>9</sup> para tener la concentración de componentes de los gases de salida de la chimenea y así poder realizar la Evaluación del Impacto Ambiental.

Esta consideración se realizó en base a la similitud de la geometría y las dimensiones (Figura 3.14) de la caldera que se simula, respecto a las calderas que son instaladas en los ingenios azucareros.

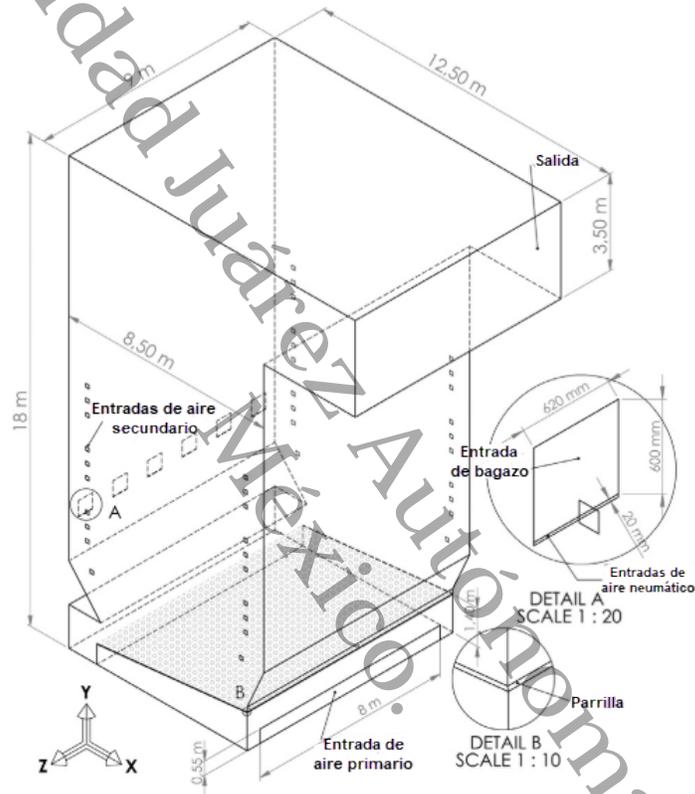


Figura 3.14: Características geométricas de una caldera. Adaptado del trabajo reportado por Centeno-González et al.<sup>9</sup>

En dicho estudio, se considera que la cantidad de bagazo entrante a la caldera es de  $81.468 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 3.3.1.3. Biorrefinería

En la Sección 3.2.1 ya se mencionó los equipos que constituirán a la biorrefinería, por lo que, a continuación, se detallan los insumos (Tabla 3.3) y los tiempos y temperatura de trabajo de cada una de las etapas (Tabla 3.4).

Como se aprecia en la Tabla 3.3, se tienen las cantidades de los insumos a utilizar para cada una de las etapas reportados por Ghosh et al.<sup>8</sup>, los cuales, serán esenciales para realizar un Inventario de Ciclo de Vida, y, mediante la aplicación del Eco-Indicador 99 y la metodología de la Evaluación de Impacto Ambiental por la Universidad de Leiden, se puede realizar el análisis de sustentabilidad.

Tabla 3.3: Insumos por etapas reportados por Ghosh et al.<sup>8</sup>

Etapa	Insumos	Cantidad
Hidrólisis ácida	Ácido sulfúrico diluido a 0.25 % w/w	0.0370 kg
	Vapor	8 L
	Bagazo	1 kg
Sacarificación enzimática	Mezcla de enzimas celulasa	0.0167 kg
	PEG6000	0.0277 kg
Producción de células	Dihidrógeno fosfato de potasio	0.0008 kg
	Sulfato de magnesio	0.0003 kg
	Hidrofosfato disódico	0.0008 kg
	<i>Kluyveromyces sp.</i> Sulfato de amonio	0.0100 kg
Producción de etanol	Dihidrógeno fosfato de potasio	0.0011 kg
	Sulfato de magnesio	0.0004 kg
	Hidrofosfato disódico	0.0011 kg
	Sulfato de amonio	0.0070 kg
Producción de furfural	Metil isobutil cetona	0.1469 kg
	Resina de intercambio catiónico	0.0441 kg

---

Tabla 3.4: Temperatura y tiempo de residencia por etapa del proceso.

Etapa	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
Hidrólisis ácida	1.5	140
Sacarificación enzimática	12	50
Producción de células	20	45
Producción de etanol	1	170
Producción de furfural	24	45

Dado que el proceso es una producción por lotes, y con base a la Tabla 3.4, se tiene que la cantidad de horas en total para la producción de biocombustible es de 45.5 h.

#### 3.3.1.4. Proceso de molienda

Por último, se tiene el proceso de molienda, en el cual, únicamente se hará una evaluación de la Huella Hídrica Verde<sup>71-73</sup> debido a que en este proceso para la extracción de jugo de la caña de azúcar, se añade agua con una relación del 30 % de agua por tonelada de caña.

Además, cabe mencionar que en el proceso de molienda, los únicos equipos existente son los molinos que su rotación es en base a vapor con una alta presión, por lo que no se evaluará como tal un impacto ambiental.

### 3.3.2. Evaluación Tecno-Económica

Para la evaluación tecno-económica, se hizo el uso específico del software Aspen Process Economic Analyzer v10, en base al proceso de producción de biocombustibles reportado por Ghosh et al.<sup>8</sup>.

Para dicha evaluación, se han hecho las consideraciones mostradas en las tablas 3.5 y 3.6, ya que la biorrefinería estará integrada al ingenio azucarero.

Tabla 3.5: Consideraciones para el diseño de ingeniería y construcción de la biorrefinería.

Nombre	Descripción
Tipo del proceso	Proceso nuevo
Complejidad del proceso	Típico
Medio para el control del proceso	Controlador Lógico Programable
Localización del proyecto	Norteamérica/México
Tipo de proyecto	Adición de una planta a una planta ya existente
Condición del suelo	Roca medianamente suave
Horas de trabajo por semana	48

La biorrefinería será un proceso nuevo con una complejidad típica (homólogo a un ingenio azucarero), con la aplicación de Controladores Lógicos Programables para el monitoreo y control del proceso. Además, para la presente investigación, se ha considerado que la locación de la biorrefinería será en el estado de Tabasco, por lo cual, se considera que la condición del suelo es una roca medianamente suave.

Debido a que la biorrefinería estará integrada a un ingenio azucarero, también se ha considerado el costo del azúcar. El precio del azúcar estándar se encuentra en un precio promedio de \$14.37 MXN<sup>74</sup>, realizando la conversión a dólares estadounidenses (con un promedio de 18.9 USD) es de 0.76 USD. Por otro lado, también se realizará una evaluación tecno-económica considerando la biorrefinería como un sistema independiente.

Tabla 3.6: Consideraciones para los parámetros de inversión para la biorrefinería.

Aspecto	Nombre	Descripción
General	Descripción del periodo	Años
	Número de semanas por periodo	52
	Número de periodos para el análisis	20
	Porcentaje de la tasa de impuesto por periodo	30 %
	Tasa deseada para el retorno por periodo	20 %
	Vida económica del proyecto en periodos	10
Parámetros de inflación	Se ha considerado que los impuestos no variarán en el tiempo	0 %
Parámetros de operación de la planta	Tipo de complejo	Industria para el procesamiento de pulpa y/o papel
	Modo de operación	Proceso por lotes – 24 h/día
	Horas de operación por periodo	4320 h
	Fluidos del proceso	Sólidos, líquidos y gases

Tabla 3.7: Precios de los insumos para la biorrefinería.

Insumos	Cantidad (kg)	USD/kg	Fuente
Ácido sulfúrico diluido a 0.25 % w/w	79.1800	37.10	Sigma-Aldrich <sup>75</sup>
PEG6000	59.2887	35.32	Biobasic <sup>76</sup>
Dihidrógeno fosfato de potasio	1.6050	17.00	PharmaCompass <sup>77</sup>
Sulfato de magnesio	0.6420	38.00	PharmaCompass <sup>78</sup>
Hidrofosfato disódico	1.6050	3.00	PharmaCompass <sup>79</sup>
Sulfato de amonio	21.4000	4.00	PharmaCompass <sup>80</sup>
Metil isobutil cetona	314.4216	63.30	Sigma-Aldrich <sup>81</sup>
Resina de intercambio catiónico	94.3265	93.00	Sigma-Aldrich <sup>82</sup>

En la Tabla 3.7 se muestran los costos de los principales insumos para la biorrefinería, los cuales fueron tomados de proveedores de insumos químicos, como Bio Basic, Sigma-Aldrich y Pharma Compass.

Por último, los costos de los equipos para la biorrefinería (Tabla 3.8) se han considerado de los costos de las etapas del trabajo reportado por Ali Mandegari et al.<sup>10</sup>. En el cual realizó una evaluación de cinco esquemas diferentes de biorrefinería, donde el esquema número dos (Figura 3.15) es similar al esquema propuesto en este trabajo, sin embargo, se diferencian de los equipos, tecnologías, y que el sistema de producción de energía utiliza las hojas secas obtenidas del proceso de cosecha de la caña de azúcar.

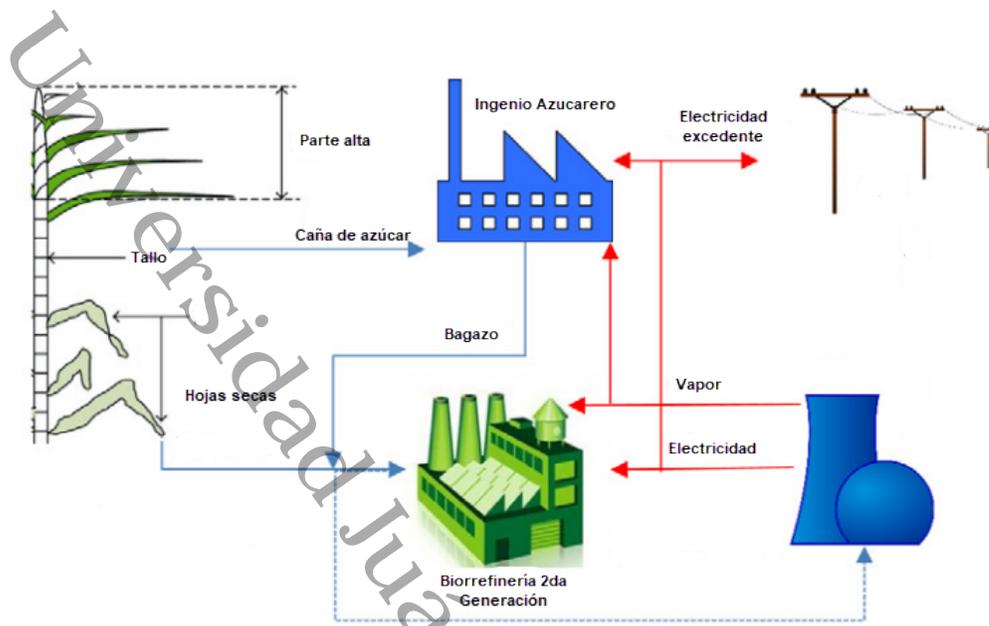


Figura 3.15: Segundo esquema de biorrefinería. Adaptado del trabajo reportado por Ali Mandegari et al.<sup>10</sup>.

Tabla 3.8: Costos instalados por etapa Ali Mandegari et al.<sup>10</sup>.

Área del proceso	M\$
Etapas de pre-tratamiento	22.6
Etapas de producción de enzimas	11.0
Etapas de sacarificación y co-fermentación simultáneo	9.7
Etapas de recuperación	14.4

### 3.3.3. Evaluación Social

Para la evaluación social, se hará un análisis de los puestos de trabajo existentes en un ingenio azucarero, para así determinar los puestos claves para el esquema de biorrefinería propuesto en este trabajo. El resultado de este análisis servirá para evaluar la sustentabilidad en la vertiente social.

### 3.3.4. Evaluación de Sustentabilidad

Para la evaluación de sustentabilidad se ha tomado la metodología reportada por Sacramento-Rivero<sup>35</sup> para determinar el porcentaje de sustentabilidad de una biorrefinería. Para realizar esta evaluación, en la Tabla 3.9 se muestra las categorías e indicadores que se propusieron en el trabajo mencionado con anterioridad. Cada indicador tiene un rango de sustentabilidad porcentual, en donde 0% es totalmente sustentable y 100% es el límite máximo de los valores aceptables de sustentabilidad.

Tabla 3.9: Indicadores para la evaluación de sustentabilidad de una biorrefinería.

Categoría temática (Nombre corto)	Indicador	Descripción
Adecuación de materia prima (Materia prima)	VPBN	Valorización del Potencial Biotecnológico Normalizado
	CMP	Consumo de Materia Prima
	FIMP	Fracción de Ingreso por la Materia prima
Desempeño en el proceso de transformación (Proceso)	RUAF	Reducción del Uso de Agua Fresca
	MBM	Margen Bruto Modificado
Capacidad de los productos para el desplazamiento del petróleo (Productos)	PENR	Participación en Energías No Renovables
	REF	Reducción de Energía Fósil
	RCMP	Relación de Costo de Materia Prima
Carga Ambiental (Medio Ambiente)	REB	Reducción de Emisiones Base
	UST	Uso Sustentable de la Tierra

Tabla 3.9 continúa de la página anterior

Categoría temática (Nombre corto)	Indicador	Descripción
Compromiso del corporativo por la sustentabilidad (Corporativo)	CSG-HSE	Conformidad del Sistema de Gerenciamiento HSE
	CSS	Conformidad en Salud y Seguridad
	RIR	Razón de Incidentes Registrables
	RAF	Razón de Accidentes Fatales
	IS	Inversión Social

A continuación, se describen únicamente los criterios que se han tomado para evaluar la sustentabilidad de la presente investigación.

### 3.3.4.1. Valorización del Potencial Biotecnológico Normalizado (VPBN)

Duarte et al.<sup>11</sup> realizaron una prueba piloto de 22 fuentes de materia prima lignocelulósica, para medir la viabilidad del uso de este tipo de materia prima en una biorrefinería. Esta prueba estuvo basada en el cumplimiento de 12 criterios (aspectos económicos, tecnológicos, geográficos y bioquímicos) los cuales se pueden ver en la tabla del Anexo 2. Cada aspecto está dado en una escala de 1 a 3 puntos, teniendo como resultado una puntuación entre 0 y 36 puntos. Considerando viables las fuentes que obtuvieron una puntuación de 21 o más, por lo tanto, Duarte et al.<sup>11</sup> establecieron 21 puntos como valor crítico para el uso de materia prima lignocelulósica en una biorrefinería. Por lo tanto, con la Ec. 3.16 se obtiene este indicador.

$$VPBN = 1 - \frac{Puntos - 21}{36 - 21} \quad (3.16)$$

Donde *Puntos* se refiere al puntaje obtenido después de que el bagazo ha sido evaluado conforme a los criterios establecidos en la tabla del Anexo 2.

---

### 3.3.4.2. Consumo de Materia Prima (CMP)

Este indicador demuestra la relación entre el uso del bagazo como materia ( $MP_{b,i}$ ) respecto a la capacidad de regeneración de la caña en campo ( $MP_{re,i}$ ). Para calcularlo, se tiene la Ec. 3.17.

$$CMP = \frac{MP_{b,i}}{MP_{re,i}} \quad (3.17)$$

### 3.3.4.3. Fracción de Ingreso por la Materia Prima (FIMP)

Está definido como el cociente del costo de la materia prima para la biorrefinería  $CMP_b$  y el valor económico de todos los productos  $VP$ .

$$FIMP = \frac{CMP_b}{VP} \quad (3.18)$$

Esta es una métrica usada para dirigir los esfuerzos de Investigación y Desarrollo hacia el avance de nuevas tecnologías<sup>83</sup>; es una métrica fácilmente cuantificable, incluido aquí como un indicador de la viabilidad económica de la biorrefinería.

### 3.3.4.4. Reducción del Uso de Agua Fresca (RUAF)

Las reservas de agua fresca son consideradas recursos renovables; en algunos países, la disponibilidad de agua fresca es de gran importancia. La demanda crítica de agua fresca está considerada en  $\leq 20\%$  del recurso disponible ( $A_a$ ) dada la consideración para el consumo sustentable de agua fresca por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE)<sup>84</sup>. Por lo tanto, la reducción de la demanda de agua fresca, requerida para alcanzar el valor crítico es denotado como  $RA_c$  y está expresado como un porcentaje de la demanda actual de agua fresca por país.

$$RA_c = \frac{0.2A_a}{A_d} \quad (3.19)$$

---

La reducción de uso de agua fresca alcanzada en una biorrefinería en relación con el sistema fósil de referencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RA_b = \frac{A_b}{A_f} \quad (3.20)$$

Donde  $A_b$  y  $A_f$  son los flujos de consumo de agua en la biorrefinería y en el sistema fósil de referencia, respectivamente. Por lo tanto, una normalización de la reducción del consumo de agua fresca puede ser calculada por:

$$RUAF = \frac{RA_b}{RA_c} \quad (3.21)$$

#### 3.3.4.5. Margen Bruto Modificado (MBM)

Esta relación financiera se refiere a la razón de la Ganancia Bruta ( $GB$ ) entre las ventas netas ( $VN$ ); ajustando la definición de MB (Margen Bruto) a la escala de sustentabilidad resulta en:

$$MBM = 1 - \frac{GB}{VN} = 1 - \frac{VN - CPV}{VN} = \frac{CPV}{VN} \quad (3.22)$$

Donde  $CPV$  se refiere al Costo de los Productos Vendidos. Esta métrica incluye costos operacionales y volumen de ventas.

#### 3.3.4.6. Relación de Costo de Materia Prima (RCMP)

Esta métrica está definida como la relación de la materia prima utilizada en el esquema de biorrefinería entre la materia usada en una refinería para la producción de biocombustible y combustible, respectivamente. Es una opción rápida para verificar la viabilidad económica de una biorrefinería al utilizar cierta materia prima.

$$RCMP = \frac{CMP_b}{CMP_f} \quad (3.23)$$

Donde  $CMP_b$  es el costo del bagazo para el caso de la presente investigación, y,  $CMP_f$  es el costo del barril de petróleo (por ser su homólogo).

---

### 3.3.4.7. Reducción de Emisiones Base (REB) de la biorrefinería

Dentro de las Evaluaciones de Ciclo de Vida hay varios enfoques para cuantificar el potencial de los impactos, por lo que se recomienda un método orientado a la evaluación del problema, como la metodología desarrollada por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden (CML); esto en concordancia con las recomendaciones por la Organización Internacional de Estandarización (ISO).

Para calcular el porcentaje de la reducción de emisiones  $i$  ( $\%RE_i$ ) se tiene:

$$\%RE_i = \frac{FE_{b,i}}{FE_{f,i}} \times 100 \quad (3.24)$$

Donde ambos flujos de emisión  $FE_b$  y  $FE_f$ , son de la biorrefinería y del sistema de referencia, respectivamente. Las unidades de ambos flujos corresponden al impacto de categoría en el cual se esté evaluando. Por lo tanto, la reducción de emisiones para cada categoría de impacto, en una escala de sustentabilidad normalizada, es:

$$RE_i = \frac{\%RE_i}{\%RE_{c,i}} \quad (3.25)$$

Es difícil llegar a un consenso sobre un método de agregación; dada la distancia a la naturaleza objetivo de las ecuaciones 3.24 y 3.25, por lo que se recomienda el uso del Método de Escasez Ecológica (ESM, Ecological Scarcity Method)<sup>85</sup>. Los factores de ponderación  $w'_i$  consisten en la distancia de cada emisión al objetivo:

$$w'_i = \left( \frac{FE}{FE_c} \right)_i^2 \quad (3.26)$$

Donde  $FE$  y  $FE_c$  son los flujos actual y objetivo promedio nacional, respectivamente. La relación  $FE/FE_c$  es el equivalente recíproco de  $\%RE_c$ , el cual es conocido como la reducción objetivo de emisiones  $i$  en la locación de la biorrefinería.

De tal manera para evitar valores más grandes que uno para el agregado REB, los factores ponderados normalizados  $w_i$  son definidos

$$w_i = \frac{\left(\frac{FE}{FE_c}\right)_i^2}{\sum_i^n \left(\frac{FE}{FE_c}\right)_i^2} \quad (3.27)$$

Donde  $n$  es la cantidad de indicadores. Finalmente, este indicador es calculado de la siguiente manera:

$$REB = \sum_i^n RE_i W_i \quad (3.28)$$

### 3.3.4.8. Inversión Social (SI)

Este indicador es tomado del Índice de Sustentabilidad del Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE SI, The American Institute of Chemical Engineers Sustainability Index)<sup>86</sup>, e involucra dos tipos de contribución a la sociedad: a través de empleos, y, a través de desarrollo de proyectos filantrópicos y de comunidad. En la aplicación piloto del AIChE SI, se encontró que el grado de empleos en la industria química va desde los 0.5 ( $GE_c$ ) hasta los cuatro ( $GE_{max}$ ) empleados por millones de dólares en ventas neta.

El Grado de Empleos ( $GE$ ) se refiere a cómo una biorrefinería puede generar empleos, y se mide de acuerdo a la cantidad de empleados por millón de dólares de ventas netas. Cuando se normaliza dentro del máximo y mínimo ( $GE_{max}$  y  $GE_c$ , respectivamente) observado en plantas de procesos químicos de acuerdo con Cobb et al.<sup>86</sup>, el valor final para la creación de empleos es:

$$GE = \frac{GE_{max} - GE_b}{GE_{max} - GE_c} \quad (3.29)$$

Donde  $GE_b$  se refiere al grado de empleos generados por la biorrefinería:

$$GE_b = \frac{VN_a}{\text{Número de empleos generados}} \quad (3.30)$$

---

Donde  $VN_a$ ,

$$VN_a = \frac{VN}{1\,000\,000} \quad (3.31)$$

Por la parte de la Inversión del Desarrollo de la Comunidad, se toma la misma idea del indicador anterior y provee información en como una planta (en este caso la biorrefinería) destina una porcentaje de sus utilidades al desarrollo de las comunidades. Esto debido que comúnmente alrededor de estos complejos existen asentamientos de personas a los cuales la actividad de la misma les impacta por los gases (y otros contaminantes) emitidos, y, el desplazamiento de los mismos.

Por lo tanto, para calcular la Inversión al Desarrollo de la Comunidad se tiene la Ec. 3.32

$$IDC = \frac{IDC_{max} - IDC_b}{IDC_{max} - IDC_c} \quad (3.32)$$

Donde  $IDC_{max}$  es igual a 0.13 y  $IDC_c$  igual a 0.03, y los cuales son los rangos de inversión para una industria química de acuerdo al AIChE SI.<sup>86</sup>

Todos los resultados obtenidos son plasmados en una gráfica de tipo radar, en donde se visualizará cada uno de los índices de sustentabilidad, para así poder determinar (de modo gráfico) el nivel de sustentabilidad del esquema de biorrefinería propuesto.

## 4 | Resultados y discusión

### 4.1. Cálculo de bagazo excedente como indicador de abundante biomasa para el esquema de biorrefinería

Para la determinación de bagazo excedente, el cual será utilizado como fuente de materia prima para la producción de biocombustibles, se obtuvieron parámetros de operación (Tabla 4.1) del ingenio azucarero más grande de Tabasco. Estos parámetros permitieron el desarrollo de las ecuaciones descritas en la Sección 3.1, las cuales se pueden ver en el Anexo 1.

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos del ingenio azucarero local.

Parámetro	Descripción	Dato obtenido
MCCF	Máxima Capacidad de Caña procesada por la Fábrica	12 000 t
CMH	Caña Molida por Hora	$450 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$
PV	Presión de Vapor	21 bar
TGC	Temperatura de los Gases a Chimenea	195 °C
TVG	Temperatura del Vapor Generado	313 °C

Tabla 4.1 continúa de la página anterior

Parámetro	Descripción	Dato obtenido
TAAC	Temperatura de Agua de Alimentación a las Calderas	106 °C
TA	Temperatura Ambiente	27 °C
CFC	Cantidad de Fibra en Caña	29 %
PDBC	Porcentaje de Basura en Caña	3 %
HB	Humedad de Bagazo	49 %
RVAE	Relación de Vapor por Agua Evaporada	50 %
O <sub>2</sub>	Oxígeno	5 %
CO	Monóxido de Carbono	0.02 %
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	90 %

Cabe mencionar que los valores del Oxígeno y Nitrógeno son cantidades teóricas mencionadas en el *"Manual para el Ingeniero Azucarero"*<sup>70</sup>; los demás datos son obtenidos por el laboratorio químico del ingenio y de los diversos instrumentos que se encuentran instalados en la fábrica.

Tabla 4.2: Resultados de la metodología para el cálculo de bagazo excedente en un ingenio azucarero.

Parámetro	Cantidad
Caña molida por día	10 800 t/d
Cantidad de bagazo generado	130.5 t · h <sup>-1</sup>
Generación de vapor por hora	225 t · h <sup>-1</sup>
Poder calorífico	1 817.3 kcal · kg <sup>-1</sup>
Cantidad de aire primario	356 733.53 kg · h <sup>-1</sup>

Tabla 4.2 continúa de la página anterior

Parámetro	Cantidad
Exceso de aire teórico	26.1 %
Coefficiente de expansión de gas	1.261
Sumatoria de aire teórico	529 513.29 kg · h <sup>-1</sup>
Flujo de diseño	20 376 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>
Flujo teórico	23 154.54 kg · h <sup>-1</sup>
Gases de salida	506 358.75 kg · h <sup>-1</sup>
Aire secundario	140 625.22 kg · h <sup>-1</sup>
Eficiencia térmica de la caldera	66 %
Cantidad necesaria de bagazo para las calderas	120.5 t · h <sup>-1</sup>
Bagazo residual	10 t · h <sup>-1</sup>

En la Tabla 4.2 se muestra de manera resumida los resultados encontrados del desarrollo de las ecuaciones del Anexo 1, lo cual nos indica que el procesar 450 t de caña por hora para este ingenio, tiene como resultado un excedente de bagazo de 10 t por hora, por lo que esto se traduce por toda la temporada de producción de azúcar (seis meses) en un total de 43 200 t de bagazo excedente. El mismo ingenio estima el bagazo residual final (por cada temporada de producción) con las dimensiones de la montaña en donde se apila el bagazo que ya no es utilizado durante su producción. Los parámetros antes mostrados en la Tabla 4.1 son del año 2017, por lo que en ese mismo año mediante el método de estimación comentado, el ingenio reportó un excedente de bagazo de 32 000 t, 11 200 t menos que lo calculado en este trabajo. Esto se puede deber principalmente a que en el ingenio se tienen programados mantenimientos a fábrica, por lo que en estos periodos no existe un flujo entrante de caña, por ende, no hay bagazo excedente. Además, como todo proceso productivo, existen problemas operativos que ocasionan paros del proceso de molienda, por lo

---

que al igual, se deja de generar bagazo excedente.

Se pueden mencionar otros muchos factores que ocasionan esta diferencia en la cantidad de bagazo calculado con lo reportado por el ingenio, inclusive, hasta con los mismos cálculos por las cifras significativas tomadas para los mismos. Sin embargo, se aprecia la cantidad de bagazo que realmente no se le da un uso, ya que éste al finalizar la temporada de producción es simplemente tapado para su uso como combustible para el arranque de la molienda del año siguiente.

## 4.2. Definición del esquema de biorrefinería

### 4.2.1. Constitución de equipos para la biorrefinería

A partir de la experimentación realizada por Ghosh et al.<sup>8</sup>, la síntesis del proceso (Figura 3.4) y el balance de masa de la Tabla 3.3 de la Sección 3.3.1.3, se ha podido obtener el balance de masa de los productos intermedios y finales de la experimentación realizada por los autores, la cual se puede visualizar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Cantidad de productos obtenidos por etapas.

Etapa	Producto (contenido)	Cantidad
Hidrólisis ácida	Líquido hidrolizado	6.62 L
	Bagazo Hidrolizado	0.5590 kg
Sacarificación enzimática	Líquido sacarificado	1.62 L
	Bagazo residual	0.2120kg
Producción de células	Biomasa celular	0.0230 kg
Producción de etanol	Etanol	0.1807 L

---

Tabla 4.3 continúa de la página anterior

Etapa	Producto (contenido)	Cantidad
Producción de furfural	Furfural	0.0558 kg

Lo anterior se traduce que con un kilogramo de bagazo que procesaron Ghosh et al.<sup>8</sup> pudieron obtener una cantidad de 0.1807 L de etanol y de 0.0558 kg de furfural en aproximadamente un tiempo de 45.5 h, dado que el proceso reportado es un proceso por lotes y este tiempo aproximado es debido a los distintos tiempos de residencia establecido para cada una de las etapas, mostrados en la Tabla 3.4 de la Sección 3.3.1.3. Por lo tanto, como parte de el análisis de sustentabilidad, se tomará como punto de partida esta cantidad de bagazo que se procesó, y, la cantidad de etanol y furfural producida.

Cabe mencionar que este balance de masa y la constitución de los equipos, se obtuvo siguiendo el proceso reportado Ghosh et al.<sup>8</sup>. El esquema de la Figura 3.4 fue simulado en Aspen Plus v10, para su uso posterior en Aspen Process Economic Analyzer para la Evaluación Tecno-Económica y su respectivo análisis de sustentabilidad.

### **4.3. Análisis de Sustentabilidad**

En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos (Eco-Indicador 99 y CML-IA) para evaluar el impacto ambiental. Los cálculos de el Análisis del Ciclo de Vida se realizaron mediante el simulador OpenLCA v1.9.0 de GreenDelta.<sup>87</sup>

#### **4.3.1. Análisis del Ciclo de Vida**

Para la presente investigación y tal como se presentó en la Figura 3.3 de la Sección 3.3.1, el estudio se delimitó en las áreas de la planta de tratamiento de agua,

gases de salida, biorrefinería y proceso de molienda, ya que la materia prima para la biorrefinería es obtenida del excedente de bagazo que se tiene después que las calderas han quemado lo necesario para poder generar vapor en la fábrica.

#### 4.3.1.1. Planta de tratamiento de agua

Las calderas requieren de agua para poder generar el vapor necesario para la fábrica, esta agua proviene de una planta de tratamiento, la cual se encarga de tratar los condensados que se obtienen de los diversos equipos instalados en el ingenio azucarero.

Un esquema general de una planta de tratamiento de agua se muestra en la Figura 3.12. El funcionamiento de la planta de tratamiento se debe gracias a la electricidad generada por la planta eléctrica, la cual a la vez trabaja debido al movimiento de turbinas de vapor, el cual es suministrado por las calderas. Por lo tanto, en esta área no se tiene resultados de impacto ambiental en cuanto al uso de electricidad para el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua. Esto es considerado en el área de las calderas, en donde se emiten gases por las chimeneas.

Por otro lado se tiene un inventario de los insumos utilizados en la planta de tratamiento por cada una de las etapas, las cuales se pueden visualizar en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Insumos utilizados en la planta de tratamiento de agua.

Etapa	Insumo utilizado
Pretratamiento	
Aireación	Ninguno
Mallado	Ninguno
Preclorinación	Cloro
Tratamiento de dureza del agua	Ninguno
Tratamiento para evitar la corrosión	Carbonato de Calcio
Filtración por malla	

Tabla 4.4 continúa de la página anterior

Etapa	Insumo utilizado
	Ninguno
Tanque de mezclado	
Adición de coagulantes	Coagulantes poliméricos
Base de floculación	Ninguno
Tanque de sedimentación	Ninguno
Filtración por arena	Ninguno
Desinfección	Cloro

Kyung et al.<sup>88</sup> determinaron que la etapa con mayor emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, es la primera etapa de aireación. Sin embargo, en la planta de tratamiento de agua del ingenio, la etapa de aireación es un proceso separado de esta misma, la cual se encuentra como un sistema de eliminación de oxígeno para el agua que se ingresará a los domos de las calderas. Por lo que por la delimitación para el Análisis del Ciclo de Vida establecida con anterioridad, no se ha considerado en los cálculos correspondientes.

#### 4.3.1.2. Gases de salida

Los gases de salida son claramente un objeto de estudio para el esquema de la biorrefinería propuesto, ya que la misma será suministrada de vapor proveniente de las calderas, por lo tanto, tal y como se analizó al inicio de este capítulo, existe emisiones de gases por la combustión del bagazo en las calderas. Esta consideración se debe principalmente a que Wiloso et al.<sup>89</sup> demuestran que el impacto del

---

calentamiento global de los escenarios basados en los principios del Análisis de Ciclo de Vida, que trata todos los resultados de entrada relevantes como flujos genuinos (incluido el carbono biogénico), proporciona resultados que en muchos casos son diferentes de aquellos que asumen neutralidad de carbono biogénico, por lo que no dejaremos las emisiones por la quema del bagazo fuera del análisis.

Como ya se mencionó en la misma sección de la metodología, para la evaluación del impacto ambiental generado por los gases de salida de la chimenea, se ha tomado como referencia el trabajo realizado por Centeno-González et al.<sup>9</sup>, ya que ellos simularon mediante Dinámica de Fluidos Computacional una caldera con características similares a las calderas instaladas en los ingenios, para determinar su desempeño durante la combustión del bagazo. Cabe mencionar que en su investigación, determinaron el balance de masa de los gases de salida de la caldera, en base a ciertas características del bagazo que se encuentra en la región donde se llevó a cabo el estudio, como la humedad y poder calorífico. Además, que la temperatura ambiente promedio del estado de Tabasco (27 °C) coincide con la temperatura ambiente del estudio realizado por Centeno-González et al.<sup>9</sup>.

Las características del bagazo que simulan son:<sup>9</sup> humedad de un 50 %, una temperatura de 26.85 °C y la cantidad de basura (ceniza) en caña de 0.88 %. La cantidad de bagazo total simulado fue de 81.468 t · h<sup>-1</sup>. El balance de masa de los gases de salida que determinaron mediante CFD es la mostrada en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Balance de masa de los gases de salida reportado por Centeno-González et al.<sup>9</sup>.

Compuesto	Cantidad
COV	19.332 kg · h <sup>-1</sup>
O <sub>2</sub>	27.972 t · h <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub>	54.972 t · h <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> O	66.132 t · h <sup>-1</sup>
CO	15.084 kg · h <sup>-1</sup>
N <sub>2</sub>	227.808 t · h <sup>-1</sup>
Total	376.91 t · h <sup>-1</sup>

---

Para determinar la cantidad de caña la cual se procesa en un ingenio, de la cual se obtuvo la cantidad de bagazo que simularon Centeno-González et al.<sup>9</sup>, se ha utilizado las ecuaciones de la Sección 3.1, las cuales fueron ingresadas a una hoja de cálculo en Excel de Microsoft Office para que mediante la herramienta de *Solver* y el uso del método "GRG nonlinear" se pudiera determinar esta cantidad de caña. Es importante recalcar que la cantidad de bagazo que simularon se refiere en la metodología de esta investigación, a la cantidad necesaria de bagazo para generar vapor en las calderas (*CNBGVC*, Ec. 3.14). Además, se definió como parámetros de los cálculos (de la metodología descrita en esta investigación), una humedad del bagazo (*HB*) del 50 % con un porcentaje de basura en caña (*PDBC*) del 0.88 % y una temperatura ambiente (*TA*) de 26.85 °C (esta cifra se refiere a la temperatura del bagazo simulado, por lo que se asume que es la temperatura ambiente).

Como ya se mencionó anteriormente, la cantidad de bagazo simulado por Centeno-González et al.<sup>9</sup> es de  $81.468 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . Con la aplicación de la herramienta *Solver* en Excel de Microsoft Office y teniendo como función objetivo la Ec. 3.14 con los parámetros ya mencionados, se ha resuelto que para tener la cantidad mencionada, se requiere de una cantidad de  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña entrante al ingenio. La cual, aplicando la metodología ya desarrollada en la presente investigación, se obtiene  $336.147 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de Gases de Salida (*GS*) de las calderas. Esta cantidad coincide en aproximadamente 90 % con la cantidad de gases de salida reportado por Centeno-González et al.<sup>9</sup>. Cabe mencionar que en el cálculo de los gases de salida están involucrados la humedad del bagazo, porcentaje de basura en caña, la cantidad de fibra, y demás parámetros que se definieron anteriormente (Tabla 4.1).

La diferencia entre resultados podría deberse a las características de la caña respecto a las regiones, además, cabe mencionar que en la investigación realizada por Centeno-González et al.<sup>9</sup> consideran un análisis elemental y aproximado del bagazo, los cuales se pueden ver en las Tablas 4.6 y 4.7, respectivamente.

Tabla 4.6: Análisis elemental del bagazo<sup>9</sup>.

Elemento	% Masa
Carbono	42.84
Hidrógeno	6.30
Oxígeno	43.96
Nitrógeno	6.90

Tabla 4.7: Análisis aproximado del bagazo<sup>9</sup>.

Elemento	% Masa
Volátiles	40.88
Carbono ajustado	8.24
Basura	0.88
Humedad	50.00

Las tablas anteriores podrían ser una de las razones de la diferencia en los resultados de los gases emitidos por las chimeneas en la investigación realizado por Centeno-González et al.<sup>9</sup> y en el presente trabajo. Tomando la relación del 90% de coincidencia (dada la geometría y configuración de la caldera simulada con respecto a las que son instaladas en los ingenios azucareros) de lo reportado por Centeno-González et al.<sup>9</sup> para la presente investigación, se tendría el siguiente balance de masa (Tabla 4.8) de los gases de salida (*GS*).

Tabla 4.8: Balance de masa de los gases de salida.

Compuesto	Cantidad
COV	17.398
O <sub>2</sub>	25.174 t · h <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub>	49.474 t · h <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> O	59.518 t · h <sup>-1</sup>
CO	13.575 kg · h <sup>-1</sup>
N <sub>2</sub>	205.027 t · h <sup>-1</sup>
Total	339.22 t · h <sup>-1</sup>

Por lo tanto, aplicando el Eco-Indicador 99 para evaluar el impacto ambiental de

estos gases mediante el uso del software OpenLCA v1.9.0, se tiene los siguientes resultados (Tabla 4.9).

Tabla 4.9: Impacto de los gases derivados de la combustión del bagazo, de acuerdo al Eco-Indicador 99.

Nombre	Sustancia	Factor de Impacto (DALY/kg)	Resultado de Impacto (DALY)
Salud Humana Efectos respiratorios	COV	$6.46 \times 10^{-7}$	$1.1239 \times 10^{-5}$
Salud Humana Efectos del cambio climático	CO <sub>2</sub>	$2.1 \times 10^{-7}$	0.0103

Con los resultados de la tabla anterior (Tabla 4.9), quiere decir que el procesar  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña en un ingenio, el cual generaría la cantidad de  $5.03 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de bagazo residual para la biorrefinería, y en base a la Tabla 4.9 se tiene que una persona estaría perdiendo 3.8 días de vida por hora, ya que un DALY se refiere a la pérdida de un año de vida para una persona,<sup>90</sup> por lo que para el tiempo total de seis meses (tiempo promedio el cual dura la temporada de zafra) de producción de azúcar de un ingenio, una persona estaría perdiendo casi 45 años de vida por estar en contacto directo con estos gases. Este impacto en el ser humano se podría evitar con el asentamiento alrededor de la fábrica o bien, con la reforestación para que el CO<sub>2</sub> emitido se pueda contrarrestar.

Comúnmente estos ingenios están asentados en localidades con baja densidad de población, por lo cual si definimos una población base de 1000 habitantes, lo anterior se estaría traduciendo que una persona de la localidad estaría perdiendo 16.425 días de vida por el total de seis meses de operación.

Y, los resultados aplicando la metodología por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden (CML - IA), se pueden visualizar en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Resultados del LCA mediante la metodología CML - IA.

Nombre	Sustancia	Factor de impacto	Resultado de impacto
Cambio Climático	CO <sub>2</sub>	$1.000 \times \text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$	$4.947 \times 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$
Oxidación fotoquímica	CO	$0.027 \times \text{kg etileno eq} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.366 kg etileno eq
Eutrofización	N <sub>2</sub>	$0.420 \times \text{kg PO}_4 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$	$8.611 \times 10^4 \text{ kg PO}_4 \text{ eq}$

Los resultados de la Tabla 4.10 serán utilizados para llevar el análisis de sustentabilidad de acuerdo con la metodología propuesta por Sacramento-Rivero<sup>35</sup>, tomando indicadores reportados por las refinерías que se encuentran en el país, ya que estos son publicados bajo la misma metodología CML-IA.

#### 4.3.1.3. Biorrefinería

Como ya se mencionó en la Sección 4.3.1, para el Análisis del Ciclo de Vida, se parte de la experimentación reportada por Ghosh et al.<sup>8</sup>. La cantidad de bagazo que ellos procesaron en el experimento para la producción de etanol y furfural fue de un kilogramo de bagazo, por lo tanto, para definir la cantidad de bagazo para el presente estudio y este esté acorde con los resultados previamente encontrados en la sección de los gases de salida, se ha considerado que el ingenio en el cual se ha integrado la biorrefinería, procesa por hora la cantidad de 298.81 t de caña. Por lo tanto, se toma la metodología establecida en la Sección 3.1 del Capítulo 3 para hallar la cantidad de bagazo excedente para la biorrefinería (ver Anexo 2) en base a la cantidad de caña ( $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Por lo tanto, en la Tabla 4.11 se muestran los parámetros de operación del ingenio azucarero, con la diferencia que la cantidad de caña procesada por hora ha cambiado (a  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Tabla 4.11: Parámetros para calcular el bagazo excedente para la biorrefinería con una entrada de  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña al ingenio

Parámetro	Descripción	Dato obtenido
MCCF	Máxima Capacidad de Caña procesada por la Fábrica	12 000 t
CMH	Caña Molida por Hora	$298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$
PV	Presión de Vapor	21 bar
TGC	Temperatura de los Gases a Chimenea	195 °C
TVG	Temperatura del Vapor Generado	313 °C
TAAC	Temperatura de Agua de Alimentación a las Calderas	106 °C
TA	Temperatura Ambiente	26.85 °C
CFC	Cantidad de Fibra en Caña	30 %
PDBC	Porcentaje de Basura en Caña	0.88 %
HB	Humedad de Bagazo	50 %
RVAE	Relación de Vapor por Agua Evaporada	50 %
O <sub>2</sub>	Oxígeno	5 %
CO	Monóxido de Carbono	0.02 %
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	90 %

Con el desarrollo de los cálculos del Anexo 2, se tiene una cantidad de 8.02 t de bagazo residual, la cual procesará la biorrefinería de acuerdo con el experimento de Ghosh et al.<sup>8</sup>, por lo tanto, el balance de masa de los insumos y productos obtenidos respecto a lo reportado por los autores se puede visualizar en las Tablas 4.12 y 4.13, respectivamente.

Tabla 4.12: Insumos para la cantidad de 8.02 t de bagazo de acuerdo con lo reportado por Ghosh et al.<sup>8</sup>.

Etapa	Insumos	Cantidad
Hidrólisis ácida	Ácido sulfúrico diluido a 0.25 % w/w	296.74 kg
	Vapor	64 160 L
	Bagazo	8.02 t
Sacarificación enzimática	Mezcla de encimas celulasa	134.25 kg
	PEG6000	222.19 kg
Producción de células	Dihidrógeno Fosfato de Potasio	6.01 kg
	Sulfato de Magnesio	2.4 kg
	Hidrofosfato Disódico	6.01 kg
	Sulfato de Amonio	80.2 kg
Producción de etanol	Dihidrógeno Fosfato de Potasio	8.42 kg
	Sulfato de Magnesio	3.36 kg
	Hidrofosfato Disódico	8.42 kg
	Sulfato de Amonio	56.14 kg
Producción de furfural	Metil Isobutil Cetona	1 178.34 kg
	Resina de intercambio catiónico	353.5 kg

Tabla 4.13: Cantidad de productos obtenidos por etapas al procesar 8.02 t de bagazo.

Etapa	Producto (contenido)	Cantidad
Hidrólisis ácida	Líquido hidrolizado	53 092.4 L
	Bagazo hidrolizado	4 483.18 kg
Sacarificación enzimática	Líquido sacarificado	56 140 L
	Bagazo residual	1 700.24 kg
Producción de células	Biomasa celular	184.46 kg
Producción de etanol	Etanol	10 147.14 L
Producción de furfural	Furfural	725.4 kg

---

Por lo tanto, los insumos son introducidos al simulador OpenLCA v1.9.0 para evaluar el impacto que estos podrían tener hacia el medio ambiente.

Los resultados que se obtiene de la simulación de estos insumos son nulos, ninguno de estos mencionados en la Tabla 4.12 generan un impacto al medio ambiente. Sin embargo, estos resultados se podrían deber a que principalmente la metodología realizada se trata de un Inventario de Ciclo de Vida.

#### 4.3.1.4. Proceso de molienda

En el proceso de molienda se ha considerado para la evaluación de la huella hídrica, ya que en conjunto con las calderas hacen uso de agua para el correcto funcionamiento de cada uno de los procesos. Cabe mencionar que en este proceso se cuenta con un tándem de molinos, los cuales funcionan mediante el vapor generado por las calderas y las emisiones son las mismas encontradas anteriormente. Un esquema general del proceso de molienda, se puede visualizar en la Figura 4.1.

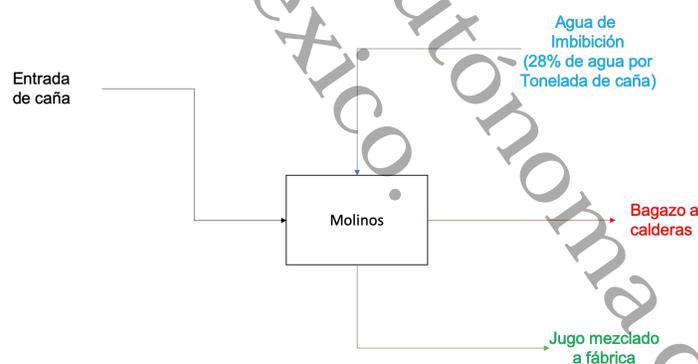


Figura 4.1: Esquema general del proceso de molienda.

Esta agua es indispensable para tener una muy buena extracción del jugo de la caña, ya que los molinos no podrían sin la ayuda de agua extraer el jugo, provocando así una obstrucción en los mismos. El agua que se añade son condensados provenientes de los equipos de la fábrica, por lo que entonces esta evaluación es considerada como la huella hídrica verde, ya que no proviene de fuentes de agua dulce.

---

Entonces, para procesar  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña en los molinos y se obtenga el bagazo con el que se producirá los biocombustibles, se requiere la relación de agua y caña de 0.28 w/w, por lo que se tendría  $83.66 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de agua (condensados).

Las calderas también requieren cierta cantidad de agua, la cual está relacionado directamente con la cantidad de vapor generado para la fábrica. Dado que el procesar  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña la fábrica demanda una total de vapor (*GVH*) de  $149.40 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ , la cantidad de agua necesaria para las calderas (específicamente los domos) es igual a  $149.40 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . Sin embargo, solo una cantidad de  $26.82 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de agua es necesaria para el proceso de hidrólisis ácida.

Cabe mencionar que el agua que se le suministra a las calderas, es también agua de los condensados generados por los equipos en fábrica, sin embargo, esta agua pasa por la planta de tratamiento de agua, y es por esta razón que se llevó a cabo un análisis de la misma. En resumen, la cantidad total de agua usada para el esquema de biorrefinería es de  $147.82 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ .

#### **4.3.2. Evaluación Tecno-Económica**

Para la evaluación tecno-económica se ha hecho uso del software Aspen Process Economic Analyzer v10. Para esto, la configuración de equipos de la biorrefinería reportada por Ghosh et al.<sup>8</sup> realizado en Aspen Plus, se exportó al software ya mencionado.

Las consideraciones para el análisis tecno-económico son mostradas en las Tablas 3.5 y 3.6 de la Sección 3.3.2 de la presente investigación. Otras consideraciones – como el precio del azúcar y costo de los insumos – también son mostradas en la misma sección.

Respecto a los costos de los equipos que constituyen a la biorrefinería, se han considerado costos de las etapas de un esquema de biorrefinería reportado por Ali Mandegari et al.<sup>10</sup>, esto debido a la similitud del esquema propuesto en esta investigación, y otras características que ya se mencionaron.

Por lo tanto, en esta sección se realizaron dos evaluaciones tecno-económicas de biorrefinerías: una considerando una biorrefinería como un sistema independiente y la otra como un sistema integrado. Estos resultados serán de ayuda para determinar la viabilidad del proyecto y comparar escenarios de biorrefinerías en la evaluación de sustentabilidad de las secciones posteriores a este capítulo.

#### 4.3.2.1. Escenario 1: Biorrefinería como sistema independiente

Para la evaluación de este escenario se han hecho las siguientes consideraciones (Tabla 4.14). Son las mismas que ya se mencionaron en la Sección 3.3.2, pero con la diferencia que el tipo de proyecto es construcción de una nueva planta.

Tabla 4.14: Consideraciones para el diseño de ingeniería y construcción de la biorrefinería como sistema independiente.

Nombre	Descripción
Tipo del proceso	Proceso nuevo
Complejidad del proceso	Típico
Modo para el control del proceso	Controladores Lógicos Programables
Locación del proyecto	Norteamérica/México
Tipo de proyecto	Construcción de una nueva planta
Condición de suelo	Roca medianamente suave
Horas de trabajo por semana	48

Tabla 4.15: Evaluación Tecno-Económica de una biorrefinería como sistema independiente.

Nombre	Descripción	Monto	Unidad
Inversión			
	Capital total para el proyecto	3 355 211.50	USD
	Costo total de operación	17 313 615.63	USD · Período <sup>-1</sup>
	Costo total de la materia prima	16 005 648.38	USD · Período <sup>-1</sup>
	Costo total de utilidades	60 422.10	USD · Período <sup>-1</sup>

Tabla 4.15 continúa de la página anterior

Nombre	Descripción	Monto	Unidad
Flujo de dinero	Venta total de productos	4 922 464.61	USD · Período <sup>-1</sup>
	Valor Presente Neto (Promedio)	-32 945 956.51	USD · Período <sup>-1</sup>
	Tasa de Retorno Neto	-72.61 %	
	Índice de Rentabilidad	0.27	

En este escenario únicamente fue evaluado los equipos, materia prima y los productos resultantes del proceso, sin considerar la demás infraestructura necesaria para su funcionamiento. Sin embargo, el resultado del valor presente neto y de la tasa de retorno neto indican que este escenario es totalmente inviable, dada la negatividad de sus resultados. Por lo que no es recomendable optar por una biorrefinería como un sistema independiente.

#### 4.3.2.2. Escenario 2: Biorrefinería como sistema integrado

Para este escenario la biorrefinería estará integrado a un ingenio azucarero, por lo que también se ha considerado el costo del azúcar. El precio del azúcar estándar se encuentra en un precio promedio de \$14.37 MXN<sup>74</sup> realizando la conversión a dólares estadounidenses (con un promedio de 18.9 USD) es de 0.76 USD. Por lo tanto, los resultados de esta evaluación encontrados en el software Aspen Process Economic Analyzer v10 son los mostrados en la Tabla 4.16

Tabla 4.16: Evaluación Tecno-Económica de una biorrefinería como sistema integrado.

Nombre	Descripción	Monto	Unidad
Inversión	Capital total para el proyecto	2 096 466.90	USD

Tabla 4.16 continúa de la página anterior

Nombre	Descripción	Monto	Unidad
	Costo total de operación	17 308 145.21	USD · Período <sup>-1</sup>
	Costo total de la materia prima	16 005 648.38	USD · Período <sup>-1</sup>
	Costo total de utilidades	60 422.10	USD · Período <sup>-1</sup>
	Venta total de productos	98 897 048.50	USD · Período <sup>-1</sup>
Flujo de dinero	Valor Presente Neto (Promedio)	142 744 680.75	USD · Período <sup>-1</sup>
	Tasa de Retorno Neto	135.15 %	
	Índice de Rentabilidad	2.35	

El índice de rentabilidad de 2.35 resultado del análisis del esquema de biorrefinería como sistema integrado al ingenio, indica que por cada dólar que se invierta se tendrá una ganancia de 2.35 USD. Además que, la tasa de retorno neto y el valor presente neto son positivos, por lo que sin duda alguna una biorrefinería integrada a un ingenio es una opción económicamente viable, ya que el producto principal elaborado en el ingenio (el azúcar) contribuye a que la biorrefinería sea económicamente sustentable.

Además, se puede apreciar la diferencia de 1 258 744.60 USD en el capital total para el proyecto, el cual si se realiza la conversión a pesos mexicanos, da un total de \$23 790 272.94 MXN. Lo que se refiere a la diferencia de emprender una biorrefinería como un sistema independiente a una biorrefinería como un sistema integrado. Sin embargo, en secciones posteriores a este capítulo se realizará la evaluación de sustentabilidad de ambos escenarios, para visualizar un poco más la diferencia.

### 4.3.3. Evaluación Social

Para la presente investigación se ha hecho un análisis de los puestos de trabajos generados al implementar una biorrefinería integrado a un ingenio azucarero. Cabe mencionar que este análisis se realizó en base a su homólogo (el cual sería el

---

mismo ingenio) para tener la cantidad de personal. Esto se llevó a cabo mediante las siguientes consideraciones.

El proceso de producción de biocombustibles será durante las 24 h del día, la jornada laboral constará de 8 h. Un ingenio azucarero cuenta en la parte de operación, con: mecánicos, eléctricos, mecánicos instrumentistas (quienes atienden problemas directo con válvulas) y eléctricos instrumentistas (quienes atienden problemas de conexión con actuadores y configuración de válvulas automáticas) en cada uno de los turnos, por lo cual se estaría generando tres vacantes por cada especialidad, estos puestos son claves para la correcta operación de los equipos y quienes estarán especializados en los equipos que constituirán la biorrefinería. Existe un laboratorista por turno, quien está a cargo de la calidad del producto final y durante toda la línea de producción, además, tiene a su cargo la correcta dosificación de insumos y reactivos en conjunto con un auxiliar de laboratorio quien está en fábrica (estos dos se encuentran en constante comunicación para cumplir con las especificaciones del producto final), por lo tanto, se estaría generando tres vacantes por puesto (laboratorista y auxiliar de laboratorio) para cada jornada laboral en la biorrefinería, quienes estarán a cargo de la calidad del producto y la correcta dosificación de insumos. Se requerirá para la producción de los biocombustibles, de un supervisor por turno quien en conjunto con un auxiliar es suficiente personal para mantener el proceso bajo control (esto mismo ocurre en un ingenio azucarero, pero con la diferencia que dentro de él, existe un supervisor por cada área: preparación y molinos, elaboración de azúcar, calderas y producción de azúcar). Como se planteó que la biorrefinería constará de un sistema automático (ver Tabla 4.14), es importante que se cuenta con un Cuarto de Control donde se esté monitoreando continuamente el proceso de producción, por lo tanto, es indispensable contar con un operador de cuarto de control por turno (este mismo puesto existe en un ingenio azucarero) para reportar posibles anomalías de las diversas variables de la biorrefinería.

Por último, cada proceso productivo debe de constar con un jefe de cada departamento, por lo tanto, se tiene un jefe/encargado de laboratorio y el

superintendente de la biorrefinería (quien tomará decisiones importantes y estará a cargo de cada uno de los supervisores de producción de biocombustibles). Por lo tanto, en la Tabla 4.17 se podrán visualizar los puestos generados para la biorrefinería de esta investigación.

Tabla 4.17: Análisis de los puestos generados para el esquema de biorrefinería. Fuente propia.

Puesto	Cantidad	Grado académico
Mecánico especialista	3	Técnico
Eléctrico	3	Técnico
Superintendente de biorrefinería	1	Ingeniería/Maestría
Supervisor de producción de biocombustible	3	Ingeniería
Mecánico instrumentista	3	Técnico
Eléctrico instrumentista	3	Técnico
Operador Cuarto de Control de la biorrefinería	3	Ingeniería
Auxiliar de producción de biocombustible	3	Ingeniería
Laboratorista	3	Licenciatura/Ingeniería
Auxiliar de laboratorio	3	Licenciatura
Encargado de laboratorio	1	Ingeniería

#### 4.4. Evaluación de Sustentabilidad

En las secciones posteriores se pretende hacer la comparación con lo que sería una refinería, para así tener indicadores que sirvan como punto de partida para futuras investigaciones en el país.

##### 4.4.1. Valorización del Potencial Biotecnológico Normalizado (VPBN)

Esta métrica mide la viabilidad de la materia prima usada en la biorrefinería, basado en el cumplimiento de 12 criterios, considerando aspectos económicos, tecno-lógicos, geográficos y bioquímicos.<sup>11</sup>

Cada aspecto está dado en una escala de 1 a 3 puntos, teniendo como resultado una puntuación entre 0 y 36 puntos. En la Tabla B.1 se muestra de manera específica, los factores y criterios a tomar en cuenta para la valorización de la materia prima usada en la biorrefinería. Para el caso del bagazo de caña de azúcar se ha determinado la siguiente Valorización del Potencial Biotecnológico, el cual se puede visualizar en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Evaluación del potencial del bagazo como materia prima para la biorrefinería.

Factores	Criterios	Puntaje
Biológico y fisicoquímico		
Naturaleza biológica	Herbáceo	3
Composición macromolecular (fracción principal o relevante)	Celulosa	1
Contenido de agua (%)	40-80	1
Características físicas	Suave y con baja densidad de materiales	2
Económico		
Temporalidad (disponible durante...)	<9 meses	2
Valor económico (USD/t)	<0	3
Dependencia del mercado	Alto	3
Tecnológico		
Tecnología aplicada actualmente/Disposición	Energía	2
Etapas de desarrollo de mejora de la tecnología	Maduro	3
Geográfico		

Tabla 4.18 continúa de la página anterior

Factores	Criterios	Puntaje
Cantidad total disponible (actual o potencial) (t/año)	>80,000	3
Concentración geográfica [t / (año Región)]	>80,000	3
Límites políticos o sociales (situación de acuerdo con la mejora)	Neutral	1
<b>Total</b>		<b>27</b>

Sin embargo, es necesario discutir los siguientes puntos para dejar en claro la manera cómo se evaluó el bagazo como materia prima, ya que se sabe que este proviene después de la extracción del jugo de la caña de azúcar.

1. Económico-Temporalidad. Se considera que el bagazo estará disponible en la fábrica menos de 9 meses, aun cuando la disponibilidad de la caña para la producción de azúcar es menor a 6 meses.
2. Económico-Valor. Como la biorrefinería estará integrada a un ingenio azucarera, el valor del bagazo será de 0 USD/t, ya que como se mencionó anteriormente, este se obtiene después de haberse extraído el jugo de la caña de azúcar. Por otra parte, en caso de que la biorrefinería no fuese integrada a un ingenio, el precio del bagazo sería de aproximadamente 23.80 USD/t.
3. Económico-Dependencia del mercado. Existen ingenios azucareros que venden este bagazo para la producción de papel, y dado la importancia de este último, se puede deducir que la dependencia del mercado es Alta.
4. Tecnológico-Disposición. Actualmente el bagazo (en su mayor parte) es usado para la generación de energía eléctrica para el ingenio, o bien, es usado para la cogeneración. Por lo que se considera 2 puntos.

---

5. Tecnológico-Actualización de la tecnología. Como ya se dijo, el bagazo es usado para la generación o cogeneración de energía eléctrica, la cual es una tecnología bien desarrollada, por lo tanto, se obtiene 3 puntos.

Aplicando la Ec. 3.16, se tiene que el uso del bagazo de caña de azúcar para la producción de biocombustibles es un 40 % sustentable.

#### **4.4.2. Consumo de Materia Prima (CMP)**

Se ha tomado la cantidad de caña de azúcar sembrada en el Estado para la evaluación del Consumo de Materia Prima. Se sabe que para obtener las  $8.02 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de bagazo residual se ha de moler una cantidad de  $298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de caña, por lo tanto, el total de caña molida durante la temporada de producción de azúcar (4320 h) es de 1,290,859.2 toneladas ( $MP_{b,i}$ ). De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera<sup>91</sup> en el año 2017, en el Estado se tuvo una producción total de caña de azúcar de 2,453,374.37 toneladas ( $MP_{re,i}$ ), aplicando la Ec. 3.16 se puede calcular el Consumo de Materia Prima, esto resulta que el uso del bagazo como materia prima para la producción de biocombustibles es sustentable en un 48 %.

#### **4.4.3. Fracción de Ingreso por Materia Prima (FIMP)**

Tal y como se menciona en la sección correspondiente del Capítulo 3, este indicador se calcula con la relación de la materia prima (el bagazo en nuestro caso de estudio) con los precios correspondientes de los productos derivados de él.

En el caso de la presente investigación, el bagazo es obtenido después del proceso de molienda, por lo cual, este no tendría costo alguno (0 USD); por otro lado, este mismo en otros ingenios lo adquieren a un costo de 23.80 USD por tonelada (aproximadamente), por lo que evaluaríamos los dos casos para tener una comparativa de este indicador.

Respecto a los costos de los biocombustibles de acuerdo a El Informador<sup>92</sup> el

---

costo del litro de bioetanol ronda los 0.74 USD y 45.6 USD el precio del kilogramo del furfural.<sup>93</sup>

Para el primero caso, donde el precio de la tonelada de bagazo es de 0 USD, la fracción de ingreso por materia prima (*FIMP*) es igual a cero. Y, para el segundo caso, donde el precio del bagazo ronda los 28.30 USD, *FIMP* es igual a 0.51. Para ambos casos el esquema de biorrefinería es sustentable, 100 % para el primero y 49 % para el segundo.

#### 4.4.4. Reducción del Uso de Agua Fresca (RUAF)

A partir de esta sección se comienza a considerar comparaciones con el homólogo a una biorrefinería, el cual sería una refinería. Los datos serán tomados de los reportes de sustentabilidad de Petróleos Mexicanos (Pemex).

La biorrefinería en la presente investigación consume agua ya tratada proveniente de los condensados de los equipos, y, dado que este indicador se refiere al consumo de agua fresca se puede decir que el esquema de biorrefinería no consume agua fresca, por lo tanto  $RUAF = 0$ . Esto quiere decir que la biorrefinería del presente estudio es un 100 % sustentable en el consumo de agua.

Considerando que la biorrefinería consuma agua fresca y de acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos<sup>94</sup>, en México, para satisfacer la demanda de agua, alrededor del 15 % de las extracciones totales provienen de fuentes no sostenibles (más de la mitad de ellas de acuíferos sobreexplotados). Lo cual significa que el consumo de agua en México puede incrementar 1.33 veces antes de llegar hasta su punto crítico.

El consumo de agua total de la biorrefinería por el tiempo total de operación es de 0.73 m<sup>3</sup> por kilogramo de biocombustible (considerando un total de 647,400.6 kg producido con un total de consumo de agua de 477,273.6 m<sup>3</sup>).

Petróleos-Mexicanos<sup>95</sup> reportó que sus refinerías tuvieron una razón de consumo de agua de 0.0024 m<sup>3</sup> de agua por kilogramo de combustible. Por lo que, aplicando

---

la Ec. 3.20, se tiene que la reducción del uso de agua fresca (para el caso que la biorrefinería se considere como sistema independiente) es 228.69.

Es fácil observar que una biorrefinería como un sistema independiente no es nada sustentable en el consumo de agua fresca, sin embargo, en este punto se estaría diciendo que ha sido considerado la cantidad de agua necesaria para extraer el bagazo de la caña de azúcar en el proceso de molienda, por lo que si se toma únicamente el consumo de agua en la etapa de hidrólisis ácida (aplicando la misma metodología) la Reducción de Consumo de Agua Fresca (*RUAF*) es de 56.06. No cabe duda que aún así, el consumo de agua es excesivo a comparación con una refinería convencional.

#### **4.4.5. Margen Bruto Modificado (MBM)**

Partiendo de los resultados del Análisis Tecno-Económico de las Tablas 4.15 y 4.16, los costos de producción de los biocombustibles son el costo total de operación, costo total de la materia prima y costo total de utilidades. Por lo tanto, para el primer caso donde la biorrefinería se evaluó como un sistema independiente, se tiene que el Margen Bruto Modificado es 6.78, lo cual comprueba que la biorrefinería como sistema independiente no es sustentable económicamente.

Por otro lado, evaluando una biorrefinería como sistema integrado resulta en un 67% sustentable económicamente, esto es debido a que las ventas del azúcar del ingenio amortigua el costo de la misma (el ingenio azucarero subsidia a la biorrefinería).

#### **4.4.6. Relación de Costo de Materia Prima (RCMP)**

Para determinar la Relación de Costo de Materia Prima se tiene que el costo del bagazo es de 0 USD, por lo tanto, al aplicar la Ec. 3.23, el indicador *RCMP* es 0, por lo que en este punto, la biorrefinería es 100% sustentable.

---

Por otro lado, si se evalúa el escenario de la biorrefinería como un sistema independiente y como ya se ha mencionado anteriormente, se tendría que el costo del bagazo es de 23.80 USD por tonelada y el costo del petróleo por barril de 63.62 USD<sup>96</sup>. Por lo cual, si se aplica la Ec. 3.23, se tiene que una biorrefinería como un sistema independiente es 96 % sustentable el usar el bagazo como materia prima. Sin embargo, la disponibilidad de este depende de la temporada de producción de azúcar, por lo cual se tendría en periodos intermitentes, caso contrario del petróleo, que es un recurso con alta disponibilidad pero finito.

Sin embargo, de acuerdo a la exergía específica de la gasolina ( $46.12 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), el diesel ( $45.92 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) y el bioetanol ( $41.87 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),<sup>97-101</sup> se tiene que la relación bioetanol-gasolina es un 9.2% sustentable y, la relación bioetanol-diesel es 8.8% sustentable. Con esto se aprecia que energéticamente el uso de biocombustible está casi por salirse de los límite de la sustentabilidad.

#### **4.4.7. Reducción de Emisiones Base (REB)**

Pemex reportó en su Informe de Sustentabilidad del año 2017<sup>102</sup> que sus seis refinерías emitieron un total de 11.40 MMTon de CO<sub>2</sub> equivalente, por una producción total de 279.95 MMb. Si se asume que las seis refinерías de Pemex produjeron la misma cantidad de productos en el 2017, se tendría que cada refinерía emitió 1.9 MMTon de CO<sub>2</sub> equivalente con una producción de aproximadamente 46.65 MMb. Además, se sabe que la biorrefinería operará por un lapso de seis meses en lo que el ingenio estará produciendo azúcar, entonces se tiene que una refinерía por este mismo periodo emitió 950 MTon de CO<sub>2</sub> equivalente por una producción de 23.32 MMb (2798.4 MML) en el año 2017.<sup>102</sup>

La biorrefinería de la presente investigación puede producir en 45.5 h un total de 6819.05 L de bicombustibles y una cantidad de 1359.58 t de azúcar, resultando en un total de 1,366,404.55 kg de productos en 45.5 h. En los seis meses de operación del ingenio, la sumatoria (de azúcar y biocombustibles) será de 129.73

---

MML de productos, por lo tanto, usando el software OpenLCA v1.9.0 para calcular las emisiones de la biorrefinería al producir la misma cantidad de productos que una refinería convencional, se tiene que la biorrefinería estará emitiendo un total de 101.32 Mton de CO<sub>2</sub> equivalente. Debido que Pemex (en la división de negocio de Refinerías) ha reportado en sus informes de sustentabilidad las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, para la presente investigación únicamente se ha evaluado las emisiones de este mismo compuesto. Por lo que la reducción de emisiones base (*REB*) para una biorrefinería integrada es 0.44, un 56 % sustentable.

En el caso de la biorrefinería como sistema independiente *REB* es igual a 21.37. Un resultado totalmente fuera del rango de acuerdo con la escala establecida por Sacramento-Rivero<sup>35</sup> (escala del 0 al 1), esto es claramente por la cantidad de productos finales que la biorrefinería puede elaborar.

#### **4.4.8. Inversión Social (IS)**

Para este indicador se tienen dos vertientes: la inversión a la comunidad por parte de la planta y el grado de generación de empleos. Para el grado de generación de empleos se tiene la Ec. 3.29, donde de acuerdo a Cobb et al.<sup>86</sup>  $GE_c$  es igual 0.5,  $GE_{max}$  es igual a cuatro y  $GE_b$  es la relación de la cantidad de empleos generados por la biorrefinería por cada millón de dólares de ventas, por lo que en el grado de generación de empleos de una biorrefinería como sistema integrado es 83 % sustentable. Por otro lado, para una biorrefinería como sistema independiente el grado de Generación de Empleos es 109 %.

Respecto a la Inversión del Desarrollo de la Comunidad se ha asumido que la biorrefinería invertirá el 0.1 % de sus ventas anuales a la sociedad, por lo tanto, el esquema de la biorrefinería propuesta en esta investigación es un 27 % sustentable socialmente. En el caso de una biorrefinería como sistema independiente *IS* es igual a 119 %.

A manera de resumen, en la Tabla 4.19 se muestran los resultados de los

indicadores calculados, tanto de la evaluación de una biorrefinería como sistema independiente y una como sistema integrado al mismo ingenio azucarero.

Tabla 4.19: Indicadores de sustentabilidad de una biorrefinería integrada a un ingenio azucarero y una biorrefinería como sistema independiente.

Criterios de Sustentabilidad	Esquema de Biorrefinería	
	Integrada a una planta	Sistema independiente
VPBN	40 %	40 %
CMP	48 %	48 %
FIMP	100 %	49 %
RUAF	100 %	22 769 %
MBM	67 %	-578 %
RCMP	100 %	96 %
REB	56 %	-2 037 %
IS	27 %	-19 %
Promedio total	67.25 %	-3 146.25 %

Como se ve en la Tabla 4.19 los resultados del análisis de sustentabilidad son mostrados en niveles porcentuales. Como se mencionó anteriormente, la escala para la evaluación de sustentabilidad va desde 0 hasta 100 por ciento, donde 100% corresponde a que el sistema es totalmente sustentable y 0% es insustentable. Respecto a los resultados, es claro observar que la biorrefinería como sistema integrado a un ingenio azucarero es un 67.25% sustentable, contrario al esquema como sistema independiente.

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se realizó un análisis de sustentabilidad integral de una biorrefinería como sistema integrado a un ingenio azucarero. El resultado general del análisis demostró que este esquema es un 67.25% sustentable, en comparación a una biorrefinería como sistema independiente el cual también se hizo los análisis correspondientes, el cual demuestra que es completamente inviable en las tres vertientes: social, económico y ambiental.

Para el estudio se consideró el bagazo excedente que tiene un ingenio azucarero durante la temporada de producción de azúcar, por lo cual, este bagazo está asociado principalmente con el proceso de combustión en las calderas para la generación de vapor para la fábrica, por lo que para este trabajo se tiene que el principal impacto ambiental generado es por los generados por los gases de salida de las chimeneas de las calderas. Los cuales impactan directamente a la salud de las familias que viven alrededor del ingenio azucarero.

Económicamente la biorrefinería integrada al ingenio azucarero es subsidiada por los principales productos elaborados (azúcar y melaza). Además, se tiene que se tendrá una ganancia del 35% por cada peso invertido en el proyecto de la biorrefinería. Caso contrario es la biorrefinería como una planta nueva, el cual tendría una pérdida de 72.61%, esto debido a la poca cantidad de productos elaborados (furfural y bioetanol).

---

Por último, socialmente la biorrefinería como sistema integrado e independiente, es capaz de generar 29 puestos de trabajo directos para su operación. Sin embargo, la biorrefinería como sistema independiente no es socialmente sustentable, ya que tiene una estrecha relación con la cantidad de productos comerciables, lo cual no sería capaz de sostener la nómina de los trabajadores.

Por lo cual se concluye que con el análisis de sustentabilidad del presente trabajo, una biorrefinería como sistema integrado a un ingenio azucarero es sustentable en sus tres vertientes, y que demuestra el potencial de usar el bagazo como fuente de materia prima para la producción de biocombustibles. Con esto, además, es notable que algunos proyectos de biorrefinerías propuestos que fueron considerados en el pasado para el Estado, tendrían pérdidas económicas por los datos que se pueden visualizar en el estudio tecno-económico.

## **Recomendaciones**

Respecto a la síntesis del proceso de la biorrefinería, es importante mencionar que la etapa de hidrólisis ácida es la que tiene un mayor consumo de energía (específicamente vapor) por lo que se recomendaría realizar futuros análisis con otros tipos de tecnologías para la extracción de los aceites esenciales para la producción de biocombustibles. Se recomendaría, además, un análisis más exhaustivo de la biorrefinería para contemplar el consumo energético total y poder obtener el índice de sustentabilidad respecto a este indicador, haciendo comparación con una refinería convencional.

Se recomienda en futuras investigaciones, realizar un balance de masa en una planta de tratamiento de agua (condensados específicamente) de una industria como lo es un ingenio azucarero, para evaluar el impacto ambiental que esta pueda generar. Además, se tendría que realizar un análisis más exhaustivo de los posibles gases emitidos en alguna de las etapas de la biorrefinería, ya que como se puede apreciar en la Tabla 4.12, se tiene ácido sulfúrico en un estado líquido, y este fue evaluado

---

como un flujo entrante al proceso, por lo cual puede existir en ciertas cantidades que se emitan a la atmósfera y sí ocasione un impacto al medio ambiente.

Por último, es recomendable tener un grupo multidisciplinario (contemplando economistas) para hacer un análisis tecno-económico más a fondo, y así poder tener resultados que brinden información para futuros proyectos en el estado de Tabasco.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## **Anexos**

## A | Cálculos para la determinación de excedente de bagazo en un ingenio azucarero

### Caña Molida por Día (CMD)

La cantidad de Caña Molida por Día  $CMD$  es calculada por la Ec. 3.1, dado que se conoce la cantidad de Caña Molida por Hora, se sustituye este dato en dicha ecuación, por lo que se tiene:

$$CMD = CMH \times 24 \text{ h}$$

$$CMD = 450 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 24 \text{ h}$$

$$CMD = 10,800 \text{ t}$$

### Cantidad de Bagazo para las Calderas (CBC)

La Cantidad de Bagazo obtenido de los molinos  $CBC$ , está dada por la Ec. 3.2, donde:

$$CBC = CMH \times CFC$$

$$CBC = 450 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 0.29$$

$$CBC = 130.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Generación de Vapor por Hora (GVH)

De acuerdo con la Ec. 3.3, y, que se conoce la Relación de Vapor por Agua Evaporada ( $RVAE$ ), se puede calcular la Generación de Vapor por Hora  $GVH$ :

$$GVH = RVAE \times CMH$$

$$GVH = 0.5 \times 450 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$GVH = 225 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Poder Calorífico (PC)

Como se muestra en la Tabla 4.1, se tiene el Porcentaje de Basura en Caña (*PDBC*) y la Humedad de Bagazo (*HB*), con los cuales se puede determinar el Poder Calorífico (*PC*) del bagazo, de acuerdo a la Ec. III.4:

$$PC = [4250 - 4850 \times HB] \times (1 - PDBC)$$

$$PC = [4250 - 4850 \times 0.49] \times (1 - 0.03)$$

$$PC = 1817.3 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Cantidad de Aire Primario (CAP)

Para calcular la Cantidad de Aire Primario (*CAP*) necesario para la combustión, se debe calcular el Exceso de Aire Teórico (*EAT*) y el Coeficiente de Expansión de Gas (*CEG*), los cuales están dados por las Ecuaciones 3.6 y 3.7, respectivamente. Además, dado que se sabe la temperatura ambiente (promedio del lugar), el Volumen Específico del Aire (*VEA*) a 27 °C es de  $0.88 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , de acuerdo con las tablas de propiedades termodinámicas reportadas en las diversas fuentes de literatura.

$$EAT = \frac{1 \times (O_2 - \frac{CO}{2})}{(0.2682 \times N_2) - (O_2 - \frac{CO}{2})}$$

$$EAT = \frac{1 \times (0.05 - \frac{0.0002}{2})}{(0.2682 \times 0.9) - (0.05 - \frac{0.0002}{2})}$$

$$EAT = 26.1 \%$$

El Coeficiente de Expansión del Gas (*CEG*) es calculada de la Ec. 3.7:

---

$$CGE = 1 + EAT$$

$$CGE = 1 + 0.261$$

$$CGE = 1.261$$

Por lo que para calcular la Cantidad de Aire Primario (*CAP*) se tiene la Ec. 3.5, donde:

$$CAP = \left( \frac{EAT \times 2.38 + 2.7045}{1.293} + 2.38 \right) \times (1 - HB) \dots$$
$$\times CEG \times CBC \times 1000 \times VEA$$

$$CAP = \left( \frac{0.261 \times 2.38 + 2.7045}{1.293} + 2.38 \right) \times (1 - 0.49) \dots$$
$$\times 1.261 \times 130.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 1000 \times 0.88$$

$$CAP = 365,733.53 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Sumatoria de Aire Teórico (SAT)

Para poder calcular la Sumatoria de Aire Teórico (*SAT*) descrita en la Ec. 3.8, primero se debe de calcular el Flujo Específico de Diseño (*FED*), el Flujo Teórico (*FT*) y la cantidad de Aire Secundario (*AS*), los cuales se desarrollan a continuación.

El *FED* está dado por la Ec. 3.12, donde:

$$FED = MCCF \times 0.0283 \times 60$$

$$FED = 12,000 \text{ t} \times 0.0283 \times 60$$

$$FED = 20,376 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

El *FT* está dado por la Ec. 3.10, donde:

$$FT = \frac{FED}{VEA}$$

$$FT = \frac{20,376 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{0.88 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$FT = 23,154.54 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Para calcular la cantidad de Aire Secundario (*AS*), primero se debe hacer el cálculo de los Gases de Salida (*GS*), el cual está definido en la Ec. 3.11:

$$GS = \frac{EAT \times 2.38 + 2.7045}{1.293} \times \left(1 + \frac{TGC}{273}\right) \times CBC \dots$$

$$\times 1000 \times VEA$$

$$GS = \frac{0.261 \times 2.38 + 2.7045}{1.293} \times \left(1 + \frac{195 \text{ }^\circ\text{C}}{273}\right) \dots$$

$$\times 130.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 1000 \times 0.88 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$GS = 506,358.75 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Por lo tanto, la cantidad de Aire Secundario se calcula mediante la Ec. 3.9 es:

$$AS = GS - CAP$$

$$AS = 506,358.75 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} - 365,733.53 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$AS = 140,625.22 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Finalmente, la Sumatoria de Aire Teórico (*SAT*) dada la Ec. 3.8 es:

$$SAT = AS + FT + CAP$$

$$SAT = 140,625.22 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} + 23,154.54 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} + 365,733.53 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$SAT = 529,513.29 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

---

### Eficiencia Térmica de la Caldera (ETC)

Para el cálculo de la eficiencia de la caldera se debe considerar la Entalpía del Vapor ( $EV$ ) y la Entalpía del Agua ( $EA$ ). El vapor generado por las calderas es un vapor sobrecalentado a  $313\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $TVG$ ) con una presión de trabajo de  $21\text{ bar}$  ( $PV$ ), por lo tanto, la entalpía del vapor es de  $727\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ . La Temperatura de Agua de Alimentación a las Caleras ( $TAAC$ ) se encuentra a  $106\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que la entalpía del agua es de  $84.6\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Estas entalpías son encontradas en las diversas tablas de propiedades termodinámicas de vapor sobrecalentado y saturado, reportadas en las diversas fuentes de literatura.

Por lo que la  $ETC$  definida en la Ec. 3.13, es:

$$ETC = \frac{GVH \times 1000 \times (EV - EA)}{[GVH \times 1000 \times (EV - EA)] + [SAT \times 0.85 \times (TGC - TA)]}$$

$$ETC = 66\%$$

### Cantidad Necesario de Bagazo para Generar Vapor en las Calderas (CNBGVC)

No todo el bagazo que se extrae del proceso de molienda es consumido por las calderas para su combustión, sino que existe una cierta cantidad necesaria para esta tarea. Es por esto que se tuvo la necesidad de realizar los cálculos anteriores, para conocer dicha cantidad. De acuerdo con la Ec. 3.14, la  $CNMGVC$  es:

$$CNBGVC = \frac{GVH \times (EV - EA)}{ETC \times PC}$$

$$CNBGVC = \frac{225\text{ t}\cdot\text{h}^{-1} \times (727\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1} - 84.6\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1})}{0.66 \times 1817.3\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}}$$

$$CNBGVC = 120.5\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$$

### Bagazo Residual (BR)

Finalmente se ha llegado al cálculo del bagazo residual, el cual es un indicador de la abundante biomasa en un ingenio azucarero.

Este bagazo es el resultado de lo que las calderas no requieren para su combustión y su cálculo está dado por la Ec. 3.15, lo cual se tiene:

---

$$BR = CBC - CNBGVC$$

$$BR = 130.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} - 120.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$BR = 10 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## B | Distribución de criterios con sus respectivos puntajes para la valorización de la materia prima para la biorrefinería

Tabla B.1: Distribución de criterios con sus respectivos puntajes para la valorización de la materia prima para la biorrefinería.<sup>11</sup>

Factores		Criterios	Puntaje		
Biológico y físicoquímico	Naturaleza biológica	Herbáceo	3		
		Madera suave	2		
		Madera dura	1		
		Mezcla	0		
	Composición macromolecular (fracción principal o relevante)	Mono-, disacáridos o almidón	Hemicelulosa (C6)	2	
			Hemicelulosa (C5)	1	
			Celulosa	1	
			Proteína/Otro	0	
			Lignina	0	
			Contenido de agua (%)	<15	3
				<40	2

Tabla B.1 continúa de la página anterior

Factores		Criterios	Puntaje
Económico	Características físicas	40-80	1
		>80	0
		Suave y con alta densidad de materiales	3
		Suave y con baja densidad de materiales	2
		Duro y alta densidad de materiales	1
	Temporalidad (disponible durante...)	Duro y baja densidad de materiales	0
		Todo el año	3
		<9 meses	2
		<6 meses	1
		<3 meses	0
	Valor económico (\$/t)	<0	3
		0-40	2
		40-120	1
		>120	0
		Dependencia del mercado	Alto
Medio	2		
Bajo	1		
Nulo	0		
Tecnológico	Tecnología aplicada actualmente/Disposición	Ninguna	3

Tabla B.1 continúa de la página anterior

Factores	Criterios	Puntaje
	Energía	2
	Reciclaje o mejora	1
	Reutilización	0
	Materia prima en la industria	0
	Etapa de desarrollo de mejora de la tecnología	
	Maduro	3
	Demostración	2
	En desarrollo	1
	Nulo	0
Geográfico	Cantidad total disponible (actual o potencial) (t/año)	
	>80,000	3
	<80,000	2
	<24,000	1
	<8,000	0
	Concentración geográfica [t / (año Región)]	
	>80,000	3
	<80,000	2
	<24,000	1
	<8,000	0
	Límites políticos o sociales (situación de acuerdo con la mejora)	
	Obligatorio o totalmente apoyado	3
	Apoyado/Subsidiado	2
	Neutral	1

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

---

Tabla B.1 continúa de la página anterior

Factores	Criterios	Puntaje
	Prohibido	0

---

## C | Cálculo del excedente de bagazo con una cantidad de 298.81 t de caña entrante al ingenio por hora

### Caña Molida por Día (CMD)

La cantidad de Caña Molida por Día  $CMD$  es calculada por la Ec. 3.1, dado que se conoce la cantidad de Caña Molida por Hora, se sustituye este dato en dicha ecuación, por lo que se tiene:

$$CMD = CMH \times 24 \text{ h}$$

$$CMD = 298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 24 \text{ h}$$

$$CMD = 7,171.44 \text{ t}$$

### Cantidad de Bagazo para las Calderas (CBC)

La Cantidad de Bagazo obtenido de los molinos  $CBC$ , está dada por la Ec. 3.2, donde:

$$CBC = CMH \times CFC$$

$$CBC = 298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 0.30$$

$$CBC = 89.64 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Generación de Vapor por Hora (GVH)

De acuerdo con la Ec. 3.3, y, que se conoce la Relación de Vapor por Agua Evaporada ( $RVAE$ ), se puede calcular la Generación de Vapor por Hora  $GVH$ :

$$GVH = RVAE \times CMH$$

$$GVH = 0.5 \times 298.81 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$GVH = 149.40 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Poder Calorífico (PC)

Como se muestra en la Tabla 4.1, se tiene el Porcentaje de Basura en Caña (*PDBC*) y la Humedad de Bagazo (*HB*), con los cuales se puede determinar el Poder Calorífico (*PC*) del bagazo, de acuerdo a la Ec. 3.4:

$$PC = [4250 - 4850 \times HB] \times (1 - PDBC)$$

$$PC = [4250 - 4850 \times 0.50] \times (1 - 0.0088)$$

$$PC = 1808.84 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Cantidad de Aire Primario (CAP)

Para calcular la Cantidad de Aire Primario (*CAP*) necesario para la combustión, se debe calcular el Exceso de Aire Teórico (*EAT*) y el Coeficiente de Expansión de Gas (*CEG*), los cuales están dados por las Ecuaciones 3.6 y 3.7, respectivamente. Además, dado que se sabe la temperatura ambiente (promedio del lugar), el Volumen Específico del Aire (*VEA*) a 26.85 °C es de 0.88 m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>, de acuerdo con las tablas de propiedades termodinámicas reportadas en las diversas fuentes de literatura.

$$EAT = \frac{1 \times (O_2 - \frac{CO}{2})}{(0.2682 \times N_2) - (O_2 - \frac{CO}{2})}$$

$$EAT = \frac{1 \times (0.05 - \frac{0.0002}{2})}{(0.2682 \times 0.9) - (0.05 - \frac{0.0002}{2})}$$

$$EAT = 26.1 \%$$

El Coeficiente de Expansión del Gas (*CEG*) es calculada de la Ec. 3.7:

---

$$CGE = 1 + EAT$$

$$CGE = 1 + 0.261$$

$$CGE = 1.261$$

Por lo que para calcular la Cantidad de Aire Primario ( $CAP$ ) se tiene la Ec. 3.5, donde:

$$CAP = \left( \frac{EAT \times 2.38 + 2.7045}{1.293} + 2.38 \right) \times (1 - HB) \dots$$
$$\times CEG \times CBC \times 1000 \times VEA$$

$$CAP = \left( \frac{0.261 \times 2.38 + 2.7045}{1.293} + 2.38 \right) \times (1 - 0.50) \dots$$
$$\times 1.261 \times 89.64 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 1000 \times 0.88$$

$$CAP = 237,691 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

### Sumatoria de Aire Teórico (SAT)

Para poder calcular la Sumatoria de Aire Teórico ( $SAT$ ) descrita en la Ec. 3.8, primero se debe de calcular el Flujo Específico de Diseño ( $FED$ ), el Flujo Teórico ( $FT$ ) y la cantidad de Aire Secundario ( $AS$ ), los cuales se desarrollan a continuación.

El  $FED$  está dado por la Ec. 3.12, donde:

$$FED = MCCF \times 0.0283 \times 60$$

$$FED = 12,000 \text{ t} \times 0.0283 \times 60$$

$$FED = 20,388 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

El  $FT$  está dado por la Ec. 3.10, donde:

$$FT = \frac{FED}{VEA}$$

$$FT = \frac{20,388 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{0.88 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$FT = 23,983 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Para calcular la cantidad de Aire Secundario (*AS*), primero se debe hacer el cálculo de los Gases de Salida (*GS*), el cual está definido en la Ec. 3.11:

$$GS = \frac{EAT \times 2.38 + 2.7045}{1.293} \times \left(1 + \frac{TGC}{273}\right) \times CBC \dots$$

$$\times 1000 \times VEA$$

$$GS = \frac{0.261 \times 2.38 + 2.7045}{1.293} \times \left(1 + \frac{195 \text{ }^\circ\text{C}}{273}\right) \dots$$

$$\times 89.64 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 1000 \times 0.88 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$GS = 335,726 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Por lo tanto, la cantidad de Aire Secundario se calcula mediante la Ec. 3.9 es:

$$AS = GS - CAP$$

$$AS = 335,726 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} - 237,691 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$AS = 98,035 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Finalmente, la Sumatoria de Aire Teórico (*SAT*) dada la Ec. 3.8 es:

$$SAT = AS + FT + CAP$$

$$SAT = 98,035 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} + 23,983 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} + 237,691 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$SAT = 359,709 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

---

### Eficiencia Térmica de la Caldera (ETC)

Para el cálculo de la eficiencia de la caldera se debe considerar la Entalpía del Vapor ( $EV$ ) y la Entalpía del Agua ( $EA$ ). El vapor generado por las calderas es un vapor sobrecalentado a  $313\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $TVG$ ) con una presión de trabajo de  $21\text{ bar}$  ( $PV$ ), por lo tanto, la entalpía del vapor es de  $727\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ . La Temperatura de Agua de Alimentación a las Calderas ( $TAAC$ ) se encuentra a  $106\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que la entalpía del agua es de  $84.6\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Estas entalpías son encontradas en las diversas tablas de propiedades termodinámicas de vapor sobrecalentado y saturado, reportadas en las diversas fuentes de literatura.

Por lo que la  $ETC$  definida en la Ec. 3.13, es:

$$ETC = \frac{GVH \times 1000 \times (EV - EA)}{[GVH \times 1000 \times (EV - EA)] + [SAT \times 0.85 \times (TGC - TA)]}$$
$$ETC = 65\%$$

### Cantidad Necesario de Bagazo para Generar Vapor en las Calderas (CNBGVC)

No todo el bagazo que se extrae del proceso de molienda es consumido por las calderas para su combustión, sino que existe una cierta cantidad necesaria para esta tarea. Es por esto que se tuvo la necesidad de realizar los cálculos anteriores, para conocer dicha cantidad. De acuerdo con la Ec. 3.14, la  $CNBGVC$  es:

$$CNBGVC = \frac{GVH \times (EV - EA)}{ETC \times PC}$$
$$CNBGVC = \frac{149.40\text{ t}\cdot\text{h}^{-1} \times (727\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1} - 84.6\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1})}{0.65 \times 1808.84\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}}$$
$$CNBGVC = 81.62\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$$

### Bagazo Residual (BR)

Este bagazo es el resultado de lo que las calderas no requieren para su combustión y su cálculo está dado por la Ec. 3.15, lo cual se tiene:

---

$$BR = CBC - CNBGVC$$

$$BR = 89.64 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} - 81.62 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$BR = 8.02 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Referencias

- (1) Conadesuca, Directorio de Ingenios y producción por Estados. [https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/GEO{\\\_}PORTAL{\\\_}CONADESUCA/Directorio{\\\_}De{\\\_}Ingenios.html](https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/GEO{\_}PORTAL{\_}CONADESUCA/Directorio{\_}De{\_}Ingenios.html), (accesado: Septiembre 19, 2018).
- (2) Realff, M. J.; Abbas, C. Industrial symbiosis: refining the biorefinery. *Journal of industrial ecology* **2003**, *7*, 5–9.
- (3) Clark, J. H.; Deswarté, F. *Introduction to chemicals from biomass*; John Wiley & Sons, 2015.
- (4) Gravitis, J. Zero techniques and systems - ZETS strength and weakness. *Journal of Cleaner Production* **2007**, *15*, 1190–1197.
- (5) Díaz, R.; Escárcega, S. Desarrollo sustentable, oportunidad para la vida. México: Editorial Mc Graw Hill Educación <http://siar.regionpuno.gob.pe/public/docs/1106.pdf> (15 de enero de 2016) **2009**,
- (6) ISO, *ISO14040: Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework*; ISO, 2006.
- (7) CNPML, Seminario sobre perspectivas del sector industrial en los mercados verdes; una oportunidad para la industria nacional. Centro Nacional de Producción Más Limpia. Medellín, Colombia., 2001.
- (8) Ghosh, D.; Dasgupta, D.; Agrawal, D.; Kaul, S.; Adhikari, D. K.; Kurmi, A. K.; Arya, P. K.; Bangwal, D.; Negi, M. S. Fuels and chemicals from lignocellulosic

- 
- biomass: An integrated biorefinery approach. *Energy and Fuels* **2015**, *29*, 3149–3157.
- (9) Centeno-González, F. O.; Silva Lora, E. E.; Villa Nova, H. F.; Mendes Neto, L. J.; Martínez Reyes, A. M.; Ratner, A.; Ghamari, M. CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler. *Fuel* **2017**, *193*, 31–38.
- (10) Ali Mandegari, M.; Farzad, S.; Görgens, J. F. Economic and environmental assessment of cellulosic ethanol production scenarios annexed to a typical sugar mill. *Bioresource Technology* **2017**, *224*, 314–326.
- (11) Duarte, L. C.; Esteves, M. P.; Carvalheiro, F.; Gírio, F. M. Biotechnological valorization potential indicator for lignocellulosic materials. *Biotechnology Journal* **2007**, *2*, 1556–1563.
- (12) Ong, H. C.; Mahlia, T. M. I.; Masjuki, H. H. A review on energy scenario and sustainable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 639–647.
- (13) Saito, S. Role of nuclear energy to a future society of shortage of energy resources and global warming. *Journal of Nuclear Materials* **2010**, *398*, 1–9.
- (14) Gurney, J. BP Statistical Review of World Energy. *Journal of Policy Analysis and Management* **2019**, *4*, 283.
- (15) Cullen, R. Evaluating renewable energy policies. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* **2017**, *61*, 1–18.
- (16) Jeswani, H. K.; Falano, T.; Azapagic, A. Life cycle environmental sustainability of lignocellulosic ethanol produced in integrated thermo-chemical biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **2015**,
- (17) Yazan, D. M.; Mandras, G.; Garau, G. Environmental and economic
-

- 
- sustainability of integrated production in bio-refineries: The thistle case in Sardinia. *Renewable Energy* **2017**, *102*, 349–360.
- (18) Secretaría De Energía, Prospectiva de Energías Renovables. *Diario Oficial de la Federación* **2016**, *1*, 94.
- (19) Azapagic, A. Sustainability considerations for integrated biorefineries. *Trends in Biotechnology* **2014**, *32*, 1–4.
- (20) Sonnenberg, A.; Baars, J.; Hendrickx, P. IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery. *IEA Bioenergy* **2013**, 28.
- (21) Gwehenberger, G.; Narodoslawsky, M. Sustainable processes—The challenge of the 21st century for chemical engineering. *Process Safety and Environmental Protection* **2008**, *86*, 321–327.
- (22) Rincón, L.E., Valencia, M.J., Becerra, L.A., Cardona, C. Estudio de escenarios agroindustriales asociados a la producción de bioetanol en México: evaluación económica y ambiental. XXVI Congreso Colombiano de Ingeniería Química. Barrancabermeja, 2011.
- (23) Taylor, S. J.; Bogdan, R.; DeVault, M. *Introduction to qualitative research methods: A guidebook and resource*; John Wiley & Sons, 2015.
- (24) Zhu, L. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *41*, 1376–1384.
- (25) Sikdar, S. K. Sustainable development and sustainability metrics. *AIChE journal* **2003**, *49*, 1928–1932.
- (26) Calleja D; Laurel H.; ; Corredor A.; ; Ovalle O, Revalorización De Algunos Residuos Agroindustriales Y Su Potencial De Aplicación a Suelos Agrícolas
-

---

Revaluation of Some Agroindustrial Residues and Their Potential for Application on Agricultural Soils. **2016**, 9, 18–23.

- (27) Ortiz L.H., Salgado G.S., R. C. La cosecha de la caña de azúcar cruda: una oportunidad para avanzar en la producción sustentable del cultivo. VII Congreso Nacional de Agricultura Sustentable. Puebla, Pue. México., 2013; pp 2190–2200.
- (28) Rincón, L. E.; Becerra, L. A.; Moncada, J.; Cardona, C. A. Techno-economic analysis of the use of fired cogeneration systems based on sugar cane bagasse in south eastern and mid-western regions of Mexico. *Waste and Biomass Valorization* **2014**, 5, 189–198.
- (29) Cardona, C. A.; Quintero, J. A.; Paz, I. C. Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology* **2010**, 101, 4754–4766.
- (30) Menon, V.; Rao, M. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science* **2012**, 38, 522–550.
- (31) Moncada B, J.; Aristizábal M, V.; Cardona A, C. A. Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal* **2016**, 116, 122–134.
- (32) Moncada, J.; Cardona, C. A.; Rincón, L. E. Design and analysis of a second and third generation biorefinery: The case of castorbean and microalgae. *Bioresource Technology* **2015**, 198, 836–843.
- (33) Moncada, J.; Tamayo, J. A.; Cardona, C. A. Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. *Chemical Engineering Science* **2014**, 118, 126–140.

- 
- (34) Aristizábal M., V.; Gómez P., Á.; Cardona A., C. A. Biorefineries based on coffee cut-stems and sugarcane bagasse: Furan-based compounds and alkanes as interesting products. *Bioresource Technology* **2015**, *196*, 480–489.
- (35) Sacramento-Rivero, J. C. A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **2012**, *6*, 32–44.
- (36) Dreyer, L. C.; Niemann, A. L.; Hauschild, M. Z. LCA Discussions Comparison of Three LCIA Methods Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 Does it matter which one you choose? *Int J LCA* **2003**, *8*, 191–200.
- (37) Halasz, L.; Povoden, G.; Narodoslowsky, M. Sustainable processes synthesis for renewable resources. *Resources, Conservation and Recycling* **2005**, *44*, 293–307.
- (38) Bozell, J. J. Feedstocks for the future—biorefinery production of chemicals from renewable carbon. *CLEAN—Soil, Air, Water* **2008**, *36*, 641–647.
- (39) Realff, M. J.; Abbas, C. Industrial symbiosis: refining the biorefinery. *Journal of industrial ecology* **2003**, *7*, 5–9.
- (40) Cherubini, F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management* **2010**, *51*, 1412 – 1421.
- (41) Wellisch, M.; Jungmeier, G.; Karbowski, A.; Patel, M. K.; Rogulska, M. Biorefinery systems—potential contributors to sustainable innovation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy* **2010**, *4*, 275–286.
-

- 
- (42) Bozell, J. J.; Petersen, G. R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy's "Top 10" revisited. *Green Chemistry* **2010**, *12*, 539–554.
- (43) de Jong, E.; van Rea, R.; van Tuil, R.; Elbersen, W. Biorefineries for the Chemical Industry—A Dutch point of view. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions* **2005**, 85–111.
- (44) Maung, T. A.; Gustafson, C. R.; Saxowsky, D. M.; Nowatzki, J.; Miljkovic, T.; Ripplinger, D. The logistics of supplying single vs. multi-crop cellulosic feedstocks to a biorefinery in southeast North Dakota. *Applied energy* **2013**, *109*, 229–238.
- (45) Ecker, J.; Schaffenberger, M.; Koschuh, W.; Mandl, M.; Böchzelt, H.; Schnitzer, H.; Harasek, M.; Steinmüller, H. Green biorefinery upper Austria—pilot plant operation. *Separation and purification technology* **2012**, *96*, 237–247.
- (46) Kamm, B.; Hille, C.; Schönicke, P.; Dautzenberg, G. Green biorefinery demonstration plant in Havelland (Germany). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy* **2010**, *4*, 253–262.
- (47) Das, B.; Kalita, P.; Chakraborty, M. *Platform Chemical Biorefinery*; Elsevier, 2016; pp 393–416.
- (48) Taylor, G. Biofuels and the biorefinery concept. *Energy policy* **2008**, *36*, 4406–4409.
- (49) Quintero, J. A.; Moncada, J.; Cardona, C. A. Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: a process simulation approach. *Bioresource technology* **2013**, *139*, 300–307.
- (50) Kadam, K. L.; Forrest, L. H.; Jacobson, W. A. Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. *Biomass and Bioenergy* **2000**, *18*, 369 – 389.
-

- 
- (51) Kamm, B.; Kamm, M. Principles of biorefineries. *Applied microbiology and biotechnology* **2004**, *64*, 137–145.
- (52) Sánchez, Ó. J.; Cardona, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology* **2008**, *99*, 5270–5295.
- (53) Cherubini, F.; Ulgiati, S. Crop residues as raw materials for biorefinery systems - A LCA case study. *Applied Energy* **2010**, *87*, 47–57.
- (54) Qureshi, N.; Saha, B. C.; Hector, R. E.; Dien, B.; Hughes, S.; Liu, S.; Iten, L.; Bowman, M. J.; Sarath, G.; Cotta, M. A. Production of butanol (a biofuel) from agricultural residues: Part II—Use of corn stover and switchgrass hydrolysates. *biomass and bioenergy* **2010**, *34*, 566–571.
- (55) Harun, R.; Singh, M.; Forde, G. M.; Danquah, M. K. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2010**, *14*, 1037–1047.
- (56) Scott, S. A.; Davey, M. P.; Dennis, J. S.; Horst, I.; Howe, C. J.; Lea-Smith, D. J.; Smith, A. G. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology* **2010**, *21*, 277 – 286.
- (57) Jaramillo, J. J.; Naranjo, J. M.; Cardona, C. A. Growth and oil extraction from *Chlorella vulgaris*: A techno-economic and environmental assessment. *Industrial and Engineering Chemistry Research* **2012**, *51*, 10503–10508.
- (58) Sánchez-Tuirán, E.; El-Halwagi, M. M.; Kafarov, V. *Integrated Biorefineries*; CRC Press, 2012; pp 730–751.
- (59) Jonker, J. G. G.; Faaij, A. P. C. Techno-economic assessment of micro-algae as feedstock for renewable bio-energy production. *Applied Energy* **2013**, *102*, 461–475.
-

- 
- (60) Clark, J. H.; Deswarte, F. *Introduction to chemicals from biomass*; John Wiley & Sons, 2014.
- (61) Bioenergy, I. E. A. Bio-based chemicals: Value added products from biorefineries. *International Energy Agency, Wageningen, The Netherlands* **2012**, 36.
- (62) PAS 600:2013 - Bio-based products. Guide to standards and claims. <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030262005>,  
Accesado: 2018-10-19.
- (63) Gallezot, P. Process options for converting renewable feedstocks to bioproducts. *Green Chemistry* **2007**, 9, 295–302.
- (64) Hart, M. Sustainable community indicators trainer's workshop. *Hart Environmental Data, North Andover, MA* **1998**,
- (65) Priego, C. La institucionalidad ambiental nacional e internacional. *de Conceptos básicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable, Buenos Aires, Overprint Grupo Impresor SRL* **2003**, 349.
- (66) Daly, H. E. De la economía de un mundo vacío a la de un mundo lleno. Reconocimiento de una coyuntura histórica en el desarrollo económico. Traducción de Mercedes Guhl Corpas. *Desarrollo Económico Sostenible. Bogotá: Tercer Mundo Uniandes* **1994**,
- (67) Sepúlveda, S. *Metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible en espacios territoriales*; IICA, 1998.
- (68) Miñón, M. A. Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible. *Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* **2002**, 11, 18.
-

- 
- (69) Töpfer, K. Editorial for Int J LCA on the launch of the UNEP-SETAC life cycle initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2002**, 7, 191–191.
- (70) Hugot, E. *Manual para ingenieros azucareros*; 1963.
- (71) Falkenmark, M.; Rockström, J. Building water resilience in the face of global change: From a blue-only to a green-blue water approach to land-water management. 2010.
- (72) Rockström, J. Green water security for the food makers of tomorrow: windows of opportunity in drought-prone savannahs. *Water Science and Technology* **2001**, 43, 71–78.
- (73) Rodrigues, D. B.; Gupta, H. V.; Mendiola, E. M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research* **2014**, 50, 7187–7205.
- (74) de Información e Integración de Mercados, S. S. N. Información de Precios de Azúcar en Centrales de Abasto Mayoristas de México. <http://www.economia-sniim.gob.mx/Azucar.asp>, 2019; Accesado: 2019-05-15.
- (75) Sigma-Aldrich, Sulfuric acid concentrate 0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in water (0.2N), eluent concentrate for IC | Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/68279?lang=en&region=US>, Accesado: 2019-04-06.
- (76) Biobasic, PEG 6000 (Poly(ethylene glycol)) - Bio Basic. <https://www.biobasic.com/peg-6000-poly-ethylene-glycol>, Accesado: 2019-04-06.
- (77) PharmaCompass, Potassium Dihydrogen Phosphate | Price | per kg | USD | PharmaCompass.com. <https://www.pharmacompass.com/price/potassium-dihydrogen-phosphate>, Accesado: 2019-04-06.
- (78) PharmaCompass, Magnesium Sulfate | Price | per kg | USD |
-

- 
- PharmaCompass.com. <https://www.pharmacompass.com/price/magnesium-sulfate>, Accesado: 2019-04-06.
- (79) PharmaCompass, Disodium Hydrogen Phosphate | Price | per kg | USD | PharmaCompass.com. <https://www.pharmacompass.com/price/disodium-hydrogen-phosphate>, Accesado: 2019-04-06.
- (80) PharmaCompass, Ammonium Sulfate | Price | per kg | USD | PharmaCompass.com. <https://www.pharmacompass.com/price/ammonium-sulfate>, Accesado: 2019-04-06.
- (81) Sigma-Aldrich, Methyl isobutyl ketone United States Pharmacopeia (USP) Reference Standard | Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/usp/1430203?lang=en&region=US>, Accesado: 2019-04-06.
- (82) Sigma-Aldrich, Dowex® MB Mixed Ion Exchange Resin | Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/d2572?lang=en&region=US>, Accesado: 2019-04-06.
- (83) Schilling, L.; Landucci, R.; Laboratory, N. R. E. Chemicals from alternative feedstocks in the United States. *FEMS microbiology reviews* **1995**, *16*, 101–110.
- (84) Environment, O.; Paris, D. Oecd key environmental indicators 2004. *Environment* **2004**, *38*.
- (85) Frischknecht, R.; Steiner, R.; Jungbluth, N. The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006. A method for impact assessment in LCA. Environmental studies no. 0906. *Publications of the FOEN* **2009**, 188 pp.
- (86) Cobb, C.; Schuster, D.; Beloff, B.; Tanzil, D. The AIChE sustainability index: the factors in detail. *Chemical Engineering Progress* **2009**, *105*, 60–63.
-

- 
- (87) GreenDelta, OpenLCA. 2018; <http://www.openlca.org/>.
- (88) Kyung, D.; Kim, M.; Chang, J.; Lee, W. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *95*, 117–123.
- (89) Wiloso, E.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Fang, K. Effect of biogenic carbon inventory on the life cycle assessment of bioenergy: challenges to the neutrality assumption. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *125*, 78–85.
- (90) Goedkoop, M. J. The Eco-indicator 99 a damage oriented method for life cycle impact assessment methodology report. *Pre Consultants* **1999**,
- (91) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>, Accesado: 2019-04-30.
- (92) Informador, E. Compran etanol por alza en gasolinas. <https://www.informador.mx/Compran-etanol-por-alza-en-gasolinas-1201801220001.html>, 2018; Accesado: 2019-04-30.
- (93) Sigma-Aldrich, Furfural price. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/185914?lang=en&region=US>, 2019; Accesado: 2019-04-30.
- (94) OCDE, Environmental Indicators - Mexico. <http://www.oecd.org/site/envind/mexico.htm>, 2019; Accesado: 2019-04-30.
- (95) Petróleos-Mexicanos, *Informe de Sustentabilidad*; 2017; Accesado: 2019-05-01.
- (96) La Economía, Precios del Petróleo. <http://laeconomia.com.mx/precios-del-petroleo/>, 2019; Accesado: 2019-05-02.
-

- 
- (97) Gharehghani, A.; Hosseini, R.; Mirsalim, M.; Jazayeri, S. A.; Yusaf, T. An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas. *Energy* **2015**, *89*, 558–567.
- (98) Kim, D. S.; Lee, C. S. Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR. *Fuel* **2006**, *85*, 695–704.
- (99) Palash, S.; Masjuki, H.; Kalam, M.; Masum, B.; Sanjid, A.; Abedin, M. State of the art of NO<sub>x</sub> mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled Compression Ignition engines. *Energy conversion and management* **2013**, *76*, 400–420.
- (100) Park, S. H.; Yoon, S. H.; Lee, C. S. Bioethanol and gasoline premixing effect on combustion and emission characteristics in biodiesel dual-fuel combustion engine. *Applied energy* **2014**, *135*, 286–298.
- (101) Şahin, Z.; Durgun, O.; Aksu, O. N. Experimental investigation of n-butanol/diesel fuel blends and n-butanol fumigation—evaluation of engine performance, exhaust emissions, heat release and flammability analysis. *Energy conversion and management* **2015**, *103*, 778–789.
- (102) Pemex, *Informe de Sustentabilidad 2017*; 2018.