



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA QUÍMICA – INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SARGAZO  
EN EL CARIBE MEXICANO

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

PRESENTA:  
I.Q. RUBÉN SÁNCHEZ GUDIÑO

TUTOR PRINCIPAL  
DR. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ TORAL, FQ, UNAM.

Ciudad Universitaria, CDMX, ENERO 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Durán Moreno Alfonso  
Secretario: Ing. Montiel Maldonado Celestino  
1 er. Vocal: Dr. Rodríguez Toral Miguel Ángel  
2 do. Vocal: M.I. Ortiz Ramírez José Antonio  
3 er. Vocal: M.I. Millan Velasco Ezequiel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:  
Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS:**

DR. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ TORAL

---

**FIRMA**

## ***Agradecimientos.***

A mi padre Vicente y a mi madre Aurora, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, por el esfuerzo y dedicación que han realizado para hacerme un hombre de bien. Su amor y guía han sido fundamental para alcanzar mis metas, agradezco de todo corazón tenerlos como padres.

A mis hermanos José, Daniel y Carolina, por ser las personas en las que más puedo confiar, cada uno de ustedes me ha ayudado a crecer y aprender algo nuevo cada día, son la mejor compañía que se puede tener y que espero tener por muchos años más ¡¡¡somos el mejor equipo!!!

A Cristina, por su amistad, apoyo, fortaleza, entusiasmo y buenos momentos juntos antes y durante el desarrollo de este trabajo, enriqueciendo todos los aspectos de mi vida y ayudándome a superarme cada día un poco más.

A mi asesor el Dr. Miguel Ángel Rodríguez Toral, por su tiempo, paciencia y disposición para orientarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis mascotas Canelo, Muffin y Tamarindo por estar presentes en todo momento y aportar toda la energía positiva para la conclusión exitosa de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, institución que me ha acompañado por un largo periodo de mi vida y donde he pasado gratos momentos que jamás olvidare; las experiencias, el conocimiento y las personas que me ha permitido conocer han sido claves en mi desarrollo personal y profesional. Siempre seré puma de corazón.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría.

*“El objetivo de la argumentación, o de la discusión, no debe ser la victoria, sino el progreso”*

*Joseph Joubert.*

## Índice.

<b>ÍNDICE.....</b>	<b>I</b>
<b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS. ....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN. ....</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 HIPÓTESIS. ....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO. ....	2
1.5 CONTENIDO DEL TRABAJO.....	2
<b>2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y DE LA PRÁCTICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 EL SARGAZO, SU ORIGEN Y CAUSAS DE SU DISEMINACIÓN EXPLOSIVA.....	4
2.2 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DEL SARGAZO. ....	5
2.3 TIPOS DE SARGAZO E IDENTIFICACIÓN DEL ENCONTRADO EN EL CARIBE MEXICANO. ....	5
2.4 USOS DEL SARGAZO.....	6
2.4.1 <i>Fertilizante</i> .....	6
2.4.2 <i>Biocombustibles</i> .....	7
2.4.3 <i>Alimento</i> .....	7
2.4.4 <i>Bioplásticos</i> .....	8
2.4.5 <i>Alginatos</i> .....	8
2.4.6 <i>Bio-sorción</i> .....	8
2.4.7 <i>Productos farmacéuticos</i> .....	8
2.4.8 <i>Papel y productos químicos</i> .....	9
2.4.9 <i>Resumen usos del sargazo</i> .....	9
2.5 TECNOLOGÍAS PARA APROVECHAR EL SARGAZO. ....	10
2.5.1 <i>Métodos de recolección</i> .....	11
2.5.2 <i>Pretratamientos y preservación del sargazo</i> .....	11
2.5.3 <i>Tecnologías termoquímicas</i> .....	12
2.5.4 <i>Tecnologías bioquímicas</i> .....	13
2.5.5 <i>Resumen de tecnologías</i> .....	15
2.6 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA.....	17
2.6.1 <i>Uso total de la biomasa</i> .....	17
2.6.2 <i>Energía o combustible obtenido</i> .....	17
2.6.3 <i>Uso reportado en literatura</i> .....	18
2.6.4 <i>Obtención de otro producto</i> .....	18
2.6.5 <i>Complejidad del proceso</i> .....	19
2.6.6 <i>Requerimiento de secado</i> .....	19
2.6.7 <i>Requerimiento de otro pretratamiento</i> .....	20
2.6.8 <i>Sargazo como materia prima ideal</i> .....	20
2.6.9 <i>Método de recolección o cultivo</i> .....	21
2.6.10 <i>Aprovechamiento de otras biomásas</i> .....	21
2.6.11 <i>Integración de diversas tecnologías</i> .....	22
2.6.12 <i>Rendimientos</i> .....	23
2.6.13 <i>Impacto ambiental de la tecnología</i> .....	26
2.6.14 <i>Matriz selección de tecnología</i> .....	27

2.7	FUNDAMENTOS DE TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO.....	28
2.7.1	<i>Digestión anaerobia.</i> .....	28
2.7.2	<i>Purificación de biogás.</i> .....	32
2.7.3	<i>Cogeneración.</i> .....	35
2.7.4	<i>Refrigeración por absorción de BrLi/ H<sub>2</sub>O.</i> .....	35
2.7.5	<i>Proceso de composta.</i> .....	36
<b>3.</b>	<b>DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA Y ALCANCE DEL PROYECTO. ....</b>	<b>38</b>
3.1	PROBLEMÁTICA DEL SARGAZO EN EL CARIBE MEXICANO.....	38
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL SARGAZO.....	39
3.3	ALCANCE DEL PROYECTO.....	41
3.3.1	<i>Objetivo del negocio.</i> .....	41
3.3.2	<i>Objetivos del proyecto.</i> .....	41
3.3.3	<i>Descripción del alcance del proyecto.</i> .....	41
3.3.4	<i>Estructura de desglose de trabajo (WBS).</i> .....	42
<b>4.</b>	<b>PROPUESTA DE PROYECTO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SARGAZO.....</b>	<b>46</b>
4.1	ESTUDIO DE MERCADO.....	46
4.1.1	<i>Objetivo.</i> .....	46
4.1.2	<i>Identificación del producto.</i> .....	46
4.1.3	<i>Área del mercado.</i> .....	48
4.1.4	<i>Análisis de la demanda.</i> .....	48
4.1.5	<i>Análisis de la oferta.</i> .....	50
4.1.6	<i>Comparación de la oferta y la demanda.</i> .....	52
4.1.7	<i>Proyección de oferta y demanda.</i> .....	52
4.1.8	<i>Determinación del precio.</i> .....	54
4.1.9	<i>Estrategia de comercialización.</i> .....	56
4.1.10	<i>Fuerzas de Porter.</i> .....	56
4.2	ANÁLISIS FODA.....	58
4.3	LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	59
4.3.1	<i>Disponibilidad y localización de materias primas.</i> .....	59
4.3.2	<i>Disponibilidad mano de obra.</i> .....	63
4.3.3	<i>Costo de vida.</i> .....	64
4.3.4	<i>Costo de servicios industriales.</i> .....	64
4.3.5	<i>Cercanía de consumidores.</i> .....	65
4.3.6	<i>Costo de terreno.</i> .....	66
4.3.7	<i>Impacto social y ambiental.</i> .....	66
4.3.8	<i>Matriz para la localización de la planta.</i> .....	68
4.4	CAPACIDAD DE LA PLANTA.....	69
4.5	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	70
4.5.1	<i>Recolección de sargazo.</i> .....	70
4.5.2	<i>Pretratamiento de sargazo.</i> .....	72
4.5.3	<i>Producción de biogás.</i> .....	73
4.5.4	<i>Tratamiento digestato.</i> .....	76
4.5.5	<i>Tratamiento de biogás.</i> .....	79
4.5.6	<i>Cogeneración.</i> .....	82
4.5.7	<i>Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O.</i> .....	84
4.6	LISTA DE EQUIPO.....	87
4.7	REQUERIMIENTOS DE SERVICIOS AUXILIARES DEL PROCESO. ....	91

4.7.1	<i>Electricidad</i> .....	91
4.7.2	<i>Vapor</i> .....	92
4.7.3	<i>Agua</i> .....	92
4.7.4	<i>Químicos</i> .....	92
4.8	PROGRAMA GENERAL DEL PROYECTO.....	93
4.9	ESTRATEGIA DE CONTRATACIÓN.....	93
4.10	ESTIMADO DE COSTOS.....	94
4.10.1	<i>Tipo de estimado de costo</i> .....	94
4.10.2	<i>Selección de estimado de costo</i> .....	94
4.10.3	<i>Información técnica disponible</i> .....	96
4.10.4	<i>Estimación de costo utilizando herramientas disponibles</i> .....	96
4.10.5	<i>Integración costo directo</i> .....	97
4.10.6	<i>Integración sobrecosto</i> .....	98
4.10.7	<i>Contingencia</i> .....	98
4.10.8	<i>Escalación</i> .....	99
4.10.9	<i>Estimado de costos clase IV</i> .....	104
4.11	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	105
4.11.1	<i>Costos</i> .....	105
4.11.2	<i>Ingresos</i> .....	111
4.11.3	<i>Depreciación</i> .....	114
4.11.4	<i>Pago de utilidades (PTU) e impuestos</i> .....	114
4.11.5	<i>Capital de trabajo</i> .....	115
4.11.6	<i>Inversión</i> .....	115
4.11.7	<i>Valor terminal</i> .....	116
4.11.8	<i>Actualización de costos e ingresos del proyecto</i> .....	117
4.11.9	<i>Estimación tasa de oportunidad</i> .....	117
4.11.10	<i>Indicadores de rentabilidad</i> .....	120
4.11.11	<i>Evaluación del proyecto</i> .....	123
4.12	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	125
4.12.1	<i>Variación tasa de oportunidad</i> .....	125
4.12.2	<i>Variación inversión inicial</i> .....	126
4.12.3	<i>Variación precio de composta</i> .....	127
4.12.4	<i>Variación costo del hongo</i> .....	128
4.12.5	<i>Variación costo del flete</i> .....	129
4.12.6	<i>Variación distancia de recolección para residuos agrícolas y purines porcinos</i> .....	130
4.12.7	<i>Variación distancia de recolección para sargazo</i> .....	131
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>133</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	133
5.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	134
<b>6.</b>	<b>ANEXO A. BALANCES DE MATERIA</b> .....	<b>135</b>
6.1	BALANCES DE MATERIA ÁREAS: PRETRATAMIENTO DE SARGAZO, PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y TRATAMIENTO DE DIGESTATO.....	135
6.2	BALANCES DE MATERIA Y SIMULACIÓN ÁREAS: TRATAMIENTO DE BIOGÁS Y COGENERACIÓN.....	138
6.3	BALANCES DE MATERIA Y SIMULACIÓN ÁREA: REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN LiBr/H <sub>2</sub> O.....	147
<b>7.</b>	<b>ANEXO B. SELECCIÓN DE TURBINA DE GAS</b> .....	<b>149</b>
7.1	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	149

7.2	SIMULACIÓN DE TURBINA DE GAS SATURN 20.....	149
<b>8.</b>	<b>ANEXO C. GRÁFICA PINCH HRSG.....</b>	<b>152</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO D. EFICIENCIA CHP Y COGENERACIÓN EFICIENTE.....</b>	<b>153</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXO E. DISEÑO DE EQUIPOS.....</b>	<b>157</b>
10.1	TANQUE DE LAVADO V-101.....	157
10.2	MOLINO M-101.....	158
10.3	TANQUE DE PRETRATAMIENTO V-102.....	160
10.4	TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN V-103.....	162
10.5	BIODIGESTOR V-201.....	164
10.6	CÁLCULO ENERGÉTICO DE BIODIGESTOR V-201 E INTERCAMBIADOR DE CALOR E-201.....	169
10.7	CÁLCULOS PROCESO DE COMPOSTA.....	170
10.8	FLUJOS MÁSICOS Y CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA DEL DIGESTATO.....	175
10.9	TANQUE DE AIREACIÓN V-401.....	177
10.10	CLARIFICADOR V-402.....	181
<b>11.</b>	<b>ANEXO F. CONSIDERACIONES SIMULACIÓN DE COSTOS EN ASPEN CAPITAL COST.....</b>	<b>183</b>
11.1	AISLAMIENTO DE BIODIGESTOR V-201.....	183
11.2	GASÓMETRO V-202.....	184
11.3	DECANTADOR CENTRÍFUGO M-401.....	186
11.4	SISTEMAS DE CONTROL.....	186
<b>12.</b>	<b>ANEXO G. PRONÓSTICO DE INPC.....</b>	<b>187</b>
<b>13.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>190</b>

## *Abreviaturas y símbolos.*

BLS = Bureau of labor statics.

CAPM = Modelo para la valoración de activos de capital.

CEL = Certificado de energía limpia.

CHP = Cogeneración.

$C_{p_i}$  = Capacidad calorífica a presión constante de i.

C:N = Relación carbono-nitrógeno.

EFP = Esquema de flujo de proceso.

HH = Horas hombre.

INPC = Índice nacional de presión al consumidor.

IPP = Índice de precios del productor.

MMSCFD = Millones de pies cúbicos estándar al día.

LHV = Poder calorífico inferior.

HHV = Poder calorífico superior.

HRSR = Recuperador de calor para generación de vapor.

OLR = Velocidad de carga orgánica.

PTU = Participación de los trabajadores en las utilidades.

SSV = Sólidos suspendidos volátiles.

SSVE = Sólidos suspendidos volátiles en el efluente.

SSVLM = Sólidos suspendidos volátiles en la mezcla de licor.

SSVR = Sólidos suspendidos volátiles en la recirculación.

ST = Sólidos totales.

SV = Sólidos volátiles.

TRH = Tiempo de retención hidráulico.

U = Coeficiente global de transferencia de energía.

## *Resumen.*

En años recientes los arribazones de sargazo han llegado masivamente a las costas del caribe mexicano, específicamente en Cancún y Puerto Morelos en Quintana Roo. La llegada de la macroalga causa un daño considerable a la industria turística y pesquera, además del daño al medio ambiente. Los esfuerzos del gobierno por combatir el problema del sargazo se enfocan en la recolección y limpieza de las playas desaprovechando la biomasa de la macroalga. Este trabajo pretende seleccionar la tecnología más adecuada para el aprovechamiento del sargazo y desarrollar la ingeniería conceptual del proyecto.

El trabajo consiste en la búsqueda bibliográfica de información relacionada con el sargazo, la discusión de los principales usos reportados en la literatura y las ventajas y desventajas de las tecnologías con potencial de aplicación para el sargazo. Se procede con el desarrollo de la ingeniería conceptual de la planta utilizando la tecnología seleccionada.

Debido a las propiedades del sargazo, su periodicidad y los residuos disponibles en la península de Yucatán se concluye que la digestión anaerobia del sargazo es la tecnología con mayor potencial para el aprovechamiento de la macroalga. La producción de biofertilizantes y biogás mediante la codigestión anaeróbica del sargazo y purines porcinos, así como el aprovechamiento del biogás mediante un esquema de cogeneración representan una alternativa real y prometedora que presenta una solución a los problemas ambientales que afectan esta región. La planta propuesta tiene una inversión inicial de \$39.88 millones de USD con una capacidad de producción de composta de 75,324 t/año y una generación de energía eléctrica de 10,947 MWh/año. El proceso propuesto además de generar energía renovable cumple con el criterio para considerarse como cogeneración eficiente. La evaluación económica indica que el proyecto es rentable con un VPN de \$60.7 millones de dólares, una TIR mayor a la tasa de descuento del proyecto de 9.98% e igual a 21.21% y un tiempo de recuperación descontado de la inversión de 7.8 años.

## 1. Introducción.

La biomasa generada en los arribazones de sargazo de las costas del Caribe Mexicano tiene el potencial de ser aprovechada para generar energía renovable y/o productos biodegradables, disminuyendo los efectos negativos asociados al uso de fuentes fósiles como es el cambio climático (Colombo & Rodríguez Cuevas, 2020). La biomasa es el material de las plantas derivado de la reacción entre CO<sub>2</sub>, agua y luz solar por medio de la fotosíntesis, transformando la energía solar en energía química la cual es almacenada en los enlaces químicos de las estructuras que componen la biomasa (Ciubota-Rosie, Gavrilesu, & Macoveanu, 2008). En la figura 1.1 se muestra el ciclo de la biomasa.

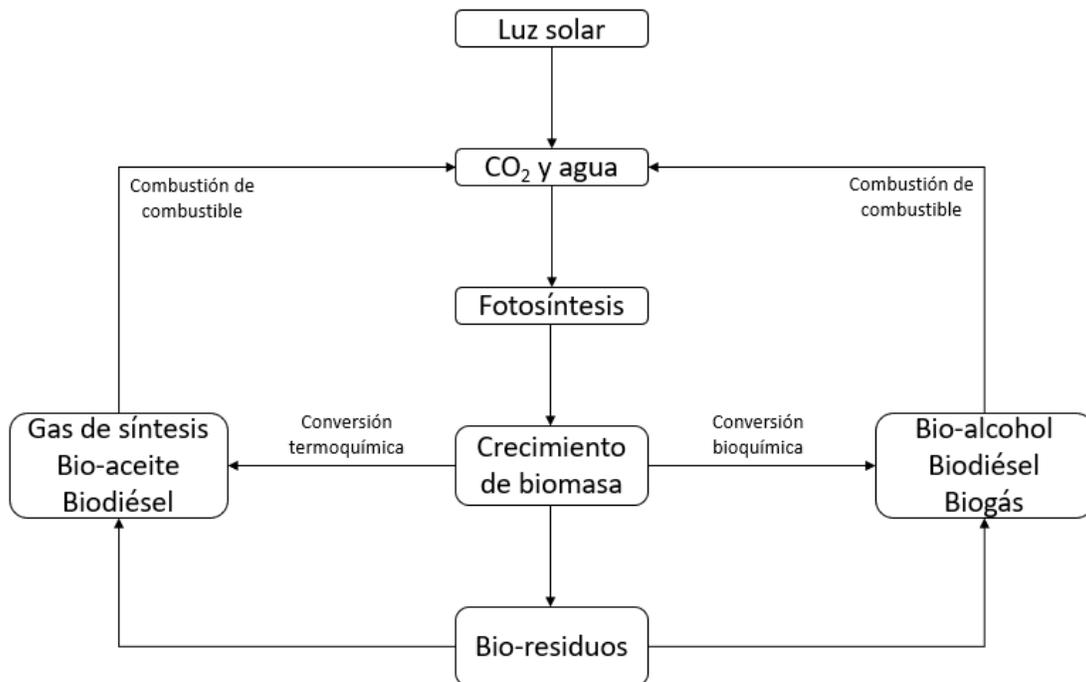


Figura 1.1 Ciclo de la biomasa. Obtenido de Ciubota-Rosie, Gavrilesu, & Macoveanu (2008).

Los bio-residuos de la figura 1.1 pueden ser aprovechados para generar productos amigables con el ambiente y de esta manera utilizar de forma más eficiente todos los compuestos contenidos en la biomasa.

### 1.1 Justificación.

En los últimos años las playas del Caribe han reportado la presencia de una cantidad inusual de la macroalga sargazo (Solano & Rodríguez, 2019). A partir del 2011 el sargazo comenzó a invadir las costas del golfo de México, Brasil y oeste africano en cantidades sin precedentes, cubriendo las playas turísticas con una capa de sargazo que en algunos casos alcanzó más de un metro de altura (Rosas Medellín, 2019). Las costas del Caribe mexicano tuvieron una gran afluencia de sargazo a mediados del 2014 y hasta finales del 2015 generando una acumulación de sargazo en descomposición (Rosas Medellín, 2019). Este fenómeno natural es relevante para el turismo, la pesca y el medio ambiente ya que repercute negativamente en las actividades de estos sectores

(Dreckmann & Senties, 2013). Esta situación nos lleva a preguntarnos ¿Cómo podemos reducir eficientemente el impacto negativo producido por los arribazones de sargazo? ¿Es posible abordar el problema del sargazo como una oportunidad para el desarrollo económico de la región?

## 1.2 Hipótesis.

El gobierno federal y del estado de Quintana Roo han realizados esfuerzos para combatir el problema del sargazo bajo el enfoque de sargazo categorizado como basura, por lo que sus acciones se centran únicamente en la recolección y limpieza de las principales áreas afectadas, desperdiciando el sargazo como una posible materia prima (Aldana Aranda, 2020). En este trabajo se propone demostrar la factibilidad de un proyecto de ingeniería enfocado en desarrollar una correcta disposición final del sargazo que arriba a las costas del Caribe Mexicano; al mismo tiempo se pretende utilizarlo como materia prima para obtener productos de valor agregado y con capacidad de comercialización, los cuales incentiven la inversión de los sectores públicos y/o privados.

## 1.3 Objetivos.

El objetivo del proyecto es desarrollar la ingeniería conceptual de un proyecto que permita atender la problemática derivada de los arribazones de sargazo a través del aprovechamiento de la macroalga, la cual se encuentra presente en gran escala en las costas del Caribe Mexicano.

## 1.4 Descripción del trabajo.

Los arribazones de sargazo consisten en la llegada masiva de macroalgas a las costas del Caribe Mexicano conformado principalmente por las especies *S. fluitans* y *S. natans* (Dreckmann & Senties, 2013) provenientes del mar de los sargazos (Torres Beristain, 2019) y de la región de recirculación del noreste de Ecuador (NERR) (Milledge & Harvey, 2016) . El sargazo en grandes cantidades afecta el medio ambiente y las actividades económicas de las regiones costeras; sin embargo, el correcto aprovechamiento de los arribazones de sargazo, además de evitar los problemas que conlleva la llegada de la macroalga a las costas del Caribe Mexicano, puede ser una oportunidad para generar productos comercializables. El trabajo consiste en el desarrollo de la ingeniería conceptual del proyecto, donde se evalúa la digestión anaerobia como la tecnología con mayor potencial para explotar la macroalga, generando biofertilizante y electricidad como productos útiles para la sociedad. La planta propuesta tiene una inversión inicial de \$39.88 millones de dólares con una capacidad de producción de composta de 75,324 t/año y una generación eléctrica de 10,947 MWh/año. La evaluación económica realizada indica que el proyecto es factible económicamente con un VPN de \$60.7 millones de dólares y una TIR igual a 21.21%.

## 1.5 Contenido del trabajo.

El trabajo se compone de 5 capítulos descritos a continuación; el capítulo 1 corresponde a la introducción donde se indica de manera breve el problema derivado del sargazo, la propuesta de solución, los objetivos del trabajo y el resumen a grandes rasgos del trabajo; el capítulo 2 trata el origen y la distribución del sargazo, se discuten los posibles usos de las macroalgas y las tecnologías

para su aprovechamiento, se concluye seleccionando la tecnología más adecuada para el procesamiento del sargazo y la descripción teórica de las tecnologías utilizadas en el proceso; en el capítulo 3 se describen los problemas derivados de los arribazones de sargazo en Quintana Roo, se presentan las principales características del sargazo y se delimita el alcance del proyecto; el capítulo 4 contiene la evaluación técnico-económica del proyecto y se compone por la localización de la planta, estudio de mercado, análisis FODA, capacidad de la planta, descripción de la planta, lista de equipos, requerimientos de servicios auxiliares, programa general del proyecto, estrategia de contratación, estimado de costos, evaluación económica y análisis de sensibilidad; por último, el capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

## 2. Revisión del estado del arte y de la práctica.

### 2.1 El sargazo, su origen y causas de su diseminación explosiva.

El sargazo es una macroalga con un papel importante en el medio ambiente, entre los beneficios que trae consigo la macroalga se puede mencionar la contribución al secuestro del CO<sub>2</sub> con un valor aproximado al 7% del total global (Thomson, Young, & Baroutian, 2019); su importancia como hábitat para tortugas, peces y mamíferos y su capacidad para proveer nutrientes y organismos a las playas (Milledge & Harvey, 2016). El sargazo es una macroalga del género *Sargassum* del tipo holopelágico; es decir, pasa toda su vida flotando en el mar formando masas flotantes de algas de enorme valor ambiental trasladándose de acuerdo a las corrientes oceánicas (García, 2019). El sargazo presenta colores pardos, negros y verdes, poseen una vesícula con gas que les permite mantenerse a flote para desarrollarse y ocupar extensas superficies en una gran variedad de hábitats (Caballero Vázquez, Acosta González, & Hernández Zepeda, 2020). Cuando hay crecimiento excesivo el sargazo se desplaza a lugares donde normalmente no existía causando problemas a la región (Torres Beristain, 2019), algunas de las causas del crecimiento masivo del sargazo se atribuyen al cambio climático, la eutrofización (Milledge & Harvey, 2016) y el desprendimiento y transporte de grandes cantidades de sargazo provenientes del mar de los sargazos (Torres Beristain, 2019) y de la región de recirculación del noreste de Ecuador (NERR) (Milledge & Harvey, 2016) debido a las corrientes oceanográficas. La figura 2.1 muestra la localización geográfica del mar de los sargazos y de la región NERR (Dreckmann & Senties, 2013).

El sargazo producido en la región NERR es transportado por medio de corrientes oceánicas, viento y oleaje al Caribe, Golfo de México y parte de las costas de Estados Unidos de América, esta zona se encuentra ubicada al norte de Ecuador, entre África y Brasil (Hernández Terrones, 2020). Por otra parte, el mar de los sargazos se encuentra formado por más de 100 especies diferentes de macroalgas, pero se constituye principalmente por sargazo en un 90% (Dreckmann & Senties, 2013). El mar de los sargazos es una región situada en el océano Atlántico septentrional, su extensión se ha estimado en 2 millones de millas cuadradas con una profundidad que no supera los 50 cm, además, su biomasa se ha calculado entre los 4 y 11 millones de toneladas en peso húmedo (Dreckmann & Senties, 2013).

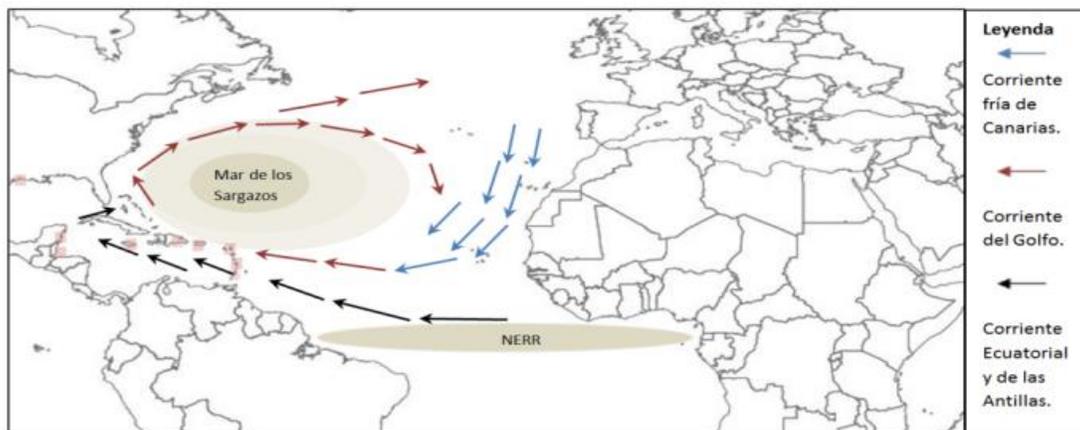


Figura 2.1. Región del mar de los sargazos y NERR, obtenido de Fernández (2017).

## 2.2 Distribución mundial del sargazo.

En la actualidad el sargazo afecta a más de 20 países en áreas como el Golfo de México, el Caribe, Sudamérica y algunas regiones del oeste de África y Europa (Solano & Rodríguez, 2019). Entre las playas más afectadas destacan las Islas Vírgenes Británicas, Seychelles, Indonesia, Guadalupe, Florida, Martinica y Yucatán (Solano & Rodríguez, 2019). En la figura 2.2 se muestra la distribución de sargazo en el año 2020.



Figura 2.2. Distribución de sargazo en el 2020. Obtenido de DJ & CJM (2020).

## 2.3 Tipos de sargazo e identificación del encontrado en el caribe mexicano.

Los arribazones algales consisten en la llegada a las playas de grandes cantidades de macroalgas las cuales pueden ser *phyla Chlorophyta* (algas verdes), *Ochrophyta* (algas pardas) o *Rhodophyta* (algas rojas) (Dreckmann & Sentías, 2013). Los arribazones algales registrados en Cancún y Puerto Morelos poseen una gran diversidad de macroalgas, de acuerdo con Dreckmann & Sentías (2013) los arribazones se encuentran constituidos por 12 especies de algas verdes, 14 de algas rojas y 14 de algas parda, sin embargo, la macroalga encontrada en mayor cantidad es el sargazo (alga parda) representando un 80% del total (Dreckmann & Sentías, 2013). Las principales especies de sargazo encontrado en los arribazones de Cancún y Puerto Morelos son las especies *S. fluitans* y *S. natans* especies endémicas del mar de los sargazos (Dreckmann & Sentías, 2013). En la figura 2.3 se observan los arribazones de sargazo en las costas del Caribe mexicano.



Figura 2.3. Arribazones de sargazo en las costas del caribe mexicano. Obtenido de Carrillo & Sheinbaum Pardo (2020).

## 2.4 Usos del sargazo.

Las macroalgas han sido utilizadas para obtener productos como puede ser alimento para humanos, fertilizantes, ingredientes para cosméticos entre otros (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014), sin embargo, su uso presenta algunos inconvenientes entre los que podemos mencionar: Cantidad de sargazo disponible poco predecible y composición variable y dependiente de la temporada (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). La extracción comercial del sargazo directamente del mar de los sargazos no se considera como una opción debido al impacto negativo que se generaría al ecosistema (Milledge & Harvey, 2016). A continuación, se describen los principales usos del sargazo.

### 2.4.1 Fertilizante.

En la literatura se encuentra reportado el uso de macroalgas cafés como composta en la agricultura (Thomson, Young, & Baroutian, 2019) y horticultura (Dreckmann & Senties, 2013) así como en jardines y en campos de golf (Rodríguez Martínez, Van Tussenbroek, & Dahlgren, 2016). El sargazo tiene una relación C:N alrededor de 7, esta relación no es buena para la producción de biocombustibles, pero puede ser ventajosa para la producción de fertilizantes aprovechando el alto contenido de cenizas en las macroalgas (Milledge & Harvey, 2016). Uno de los problemas relacionado al uso de macroalgas como fertilizante es su contenido en metales pesados, para el caso específico del sargazo Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek (2020) indica que los arribazones de sargazo en Quintana Roo contienen cantidades significativas de As por lo que su uso como fertilizantes debe ser controlado adecuadamente. A. Sembera, J. Meier, & M. Waliczek (2018) y T. Walsh (2018) presentan estudios en los que el sargazo recolectado de las especies presentes en los arribazones de México (*S. fluitans* y *S. natans*) mezclados con residuos de madera y residuos de restaurantes en diferentes proporciones generan composta de calidad. La comercialización del

sargazo como fertilizante solo se ha desarrollado a pequeña escala (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) por medio de la gente que habita las regiones donde llegan los arribazones de sargazo. Las ventajas reportadas del uso de sargazo como fertilizantes son las siguientes:

- Mejora la capacidad de retención de agua y provee un mayor crecimiento a las plantas (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).
- Mejora la aireación y estructura del suelo (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).
- Composición de N y K adecuada para sustituir estiércoles o fertilizantes químicos, pero es relativamente bajo en P (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).
- Alto contenido en minerales (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015) especialmente en Na, Mg, K, Ca y Zn (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).
- Mejora la germinación de las semillas (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015).
- Incrementa la resistencia al frío (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015).
- Incrementa la resistencia a plagas por hongos e insectos (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015).
- Mejora la actividad enzimática del suelo (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).
- Incrementa la composición orgánica del suelo (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).

#### 2.4.2 Biocombustibles.

El uso de la biomasa para producir energía es una alternativa para disminuir el impacto ambiental derivado de la producción de energía con combustibles fósiles (Mckendry, 2002). Las macroalgas como el sargazo no compiten por recursos como el agua, tierra y uso de fertilizantes resultando en una excelente opción para la producción de biocombustibles (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). La habilidad del sargazo para absorber CO<sub>2</sub>, su alto contenido en carbohidratos y su bajo contenido de lignina hacen de esta macroalga una materia prima cercana a la ideal para la producción de biogás (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) y/o bioetanol (Kumar, y otros, 2016). Rodríguez Martínez, Van Tussenbroek, & Dahlgren (2016) recomiendan la recolección del sargazo antes de mezclarse con la arena para evitar procesos inhibidores en la generación de los biocombustibles.

#### 2.4.3 Alimento.

Las macroalgas cafés son consumidas en Asia y Europa como una alternativa natural a los alimentos tradicionales (Thomson, Young, & Baroutian, 2019). Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) mencionan al sargazo como un posible alimento debido a su alto contenido en carbohidratos, asimismo de acuerdo con Thomson, Young, & Baroutian (2019) el sargazo es rico en fibra donde una porción de 8 g satisface el 12.5% de la demanda diaria del consumo humano. Se ha encontrado que la especie de sargazo *S. natans* contiene ácidos grasos poliinsaturados, siendo particularmente rico en ácido docosahexaenoico (DHA) compuesto utilizado como suplemento en formulas infantiles y en dietas para adultos, sin embargo, a pesar de que el sargazo parece prometedor como fuente de ácidos grasos poliinsaturados para la nutrición humana o animal, las eficiencias por unidad de biomasa seca son bajas con valores de 0.5% (Milledge & Harvey, 2016). El alto contenido de elementos inorgánicos y metales pesado puede significar un riesgo para el consumo humano (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016), además su limitada digestibilidad y poco balance de proteínas y carbohidratos restringe su uso como alimento (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015).

#### 2.4.4 Bioplásticos.

Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) presentan la idea de utilizar las macroalgas para producir bioplásticos debido a su alto contenido en carbohidratos. Los bioplásticos son plásticos hechos de diferentes tipos de biomasa los cuales se degradan más rápido que los plásticos tradicionales. La información del uso de sargazo como bioplástico es limitada, sin embargo, existen estudios del uso de macroalgas caféas como materia prima para extraer directamente los polisacáridos (alginatos) y obtener por fermentación ácido láctico, ambos utilizados en la manufactura de los bioplásticos (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020). La biomasa de las macroalgas caféas también puede ser comprimida en conjunto con otros materiales para hacer bioplásticos que replacen los plásticos de un solo uso (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020).

#### 2.4.5 Alginatos.

Los alginatos son polímeros hidrófilos constituido principalmente por el ácido algínico (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) utilizados en la industria alimentaria, textil, farmacéutica, cosmética, etc (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020). El alginato es un polisacárido encontrado de forma natural en las paredes celulares de las algas caféas (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). Los alginatos contenidos en las macroalgas caféas representan aproximadamente un 45% de su masa seca (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016), sin embargo, para el caso específico del sargazo el contenido oscila entre el 7% y el 10% de su masa seca (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020). Aunque el sargazo ha sido utilizado para producir alginatos su producción presenta rendimientos bajos comparados con las macroalgas caféas comercialmente explotadas (Milledge & Harvey, 2016). Finalmente, los alginatos encontrados en el sargazo no están presentes en calidad ni cantidad suficiente para su extracción comercial (Rodríguez Martínez, Van Tussenbroek, & Dahlgren, 2016).

#### 2.4.6 Bio-sorción.

Las macroalgas en su proceso de crecimiento tienen la facilidad de remover contaminantes del agua, esto significa que las macroalgas pueden reducir la eutrofización (Murphy, y otros, 2015). La bio-sorción de metales pesados utilizando macroalgas está siendo explorada como una alternativa costo-efectiva a las tecnologías tradicionales, donde se ha encontrado que el sargazo remueve exitosamente Pb, Cu, Zn y Mn (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).

#### 2.4.7 Productos farmacéuticos.

Uno de los usos farmacéuticos de las macroalgas es el aprovechamiento de los polisacáridos sulfatados los cuales han mostrado tener propiedades antivirales (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015). Los fucanos sulfatados son un tipo de polisacáridos sulfatados encontrados en las macroalgas caféas, no son considerados tóxicos y han sido propuestos como anticoagulante, antiinflamatorio, antifúngico, antioxidante, antitumoral, además de poder inhibir las infecciones por virus (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020). La producción de fucanos a partir del sargazo es un área poco explorada pero prometedora para comercializar en un futuro (Milledge & Harvey, 2016). Otro compuesto encontrado en las macroalgas caféas es el carotenoide fucoxantina, el cual es un importante antioxidante, antiinflamatorio y antitumoral, la biosíntesis de este compuesto usando macroalgas es poco entendida. Es necesario una mayor investigación para poder producir la

fucoxantina a partir del sargazo para fines comerciales (Milledge & Harvey, 2016). A pesar de sus posibilidades para desarrollar fármacos los contaminantes de las mareas de sargazo, su composición variante o indefinida y su periodicidad hacen del sargazo una materia prima poco ideal para su desarrollo en la industria farmacéutica (Milledge & Harvey, 2016).

#### 2.4.8 Papel y productos químicos.

Las macroalgas fueron utilizadas para producir diversos productos químicos como el carbonato de sodio y el carbonato de potasio, sin embargo, estos fueron remplazados por procesos más baratos y eficientes para su obtención (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015). Las macroalgas también han sido consideradas como materia prima para la producción de papel debido a su contenido de celulosa y bajo nivel de lignina; la extracción y uso de alginatos de las macroalgas en la industria papelera mejora la resistencia al agua y suavidad del papel (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020). La producción de papel con macroalgas está enfocada al uso de macroalgas rojas y verdes, no obstante, las macroalgas café han mostrado tener un buen potencial en esta área existiendo en México la empresa Salgax la cual trabaja en la elaboración de papel a partir de sargazo y pequeños negocios que comercializan de forma artesanal papel, cuadernos y cartulinas con base sargazo (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020).

#### 2.4.9 Resumen usos del sargazo.

En la tabla 2.1 se presenta el resumen de las ventajas y desventajas en los posibles usos del sargazo.

Tabla 2.1. Resumen ventajas y desventajas usos del sargazo. Elaboración propia.

Usos/Productos	Ventajas	Desventajas
Fertilizante	<p>Mejora la retención del agua, la aireación y la estructura del suelo (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>Incrementa la resistencia al frío y plagas (Milledge, Nielsen, &amp; Bailey, 2015).</p> <p>Mayor uso de biomasa (Milledge &amp; Harvey, 2016).</p> <p>Aumenta composición orgánica del suelo (Thomson, Young, &amp; Baroutian, 2019).</p> <p>Mejora el crecimiento de plantas (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p>	<p>Contaminantes contenidos en las macroalgas como metales pesados (González Mancera, Tehuacanero, &amp; Chavira, 2019).</p> <p>Requiere desarrollar mercado (Milledge &amp; Harvey, 2016).</p>
Biocombustible	<p>No compiten por recursos (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>No requiere etapa de cultivo si se aprovechan los arribazones de sargazo.</p> <p>Disminuye impacto ambiental (Mckendry, 2002).</p> <p>Alto contenido de carbohidratos y bajo contenido de lignina (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>Rapidez de crecimiento alta (Rocca, Agostini, Giuntoli, &amp; Marelli, 2015).</p>	<p>Baja relación C:N (Milledge &amp; Harvey, 2016).</p> <p>Cantidades importantes de fibra (Thomson, Young, &amp; Baroutian, 2019).</p> <p>Alto contenido de cenizas (Milledge &amp; Harvey, 2016).</p>

Alimentos	Alto contenido de carbohidratos (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). Puede suplir parte de los requerimientos de fibra (Thomson, Young, & Baroutian, 2019). Fuente de yodo (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015).	Riesgo de consumo por alto contenido de elementos inorgánicos (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). Proteínas y carbohidratos de difícil digestión (González Mancera, Tehuacanero, & Chavira, 2019). Desbalance nutricional (Milledge & Harvey, 2016).
Bioplásticos	Amigables con el ambiente (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).	Poca información y desarrollo del uso de sargazo para producir bioplásticos (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).
Alginatos	Se encuentran de forma natural en las macroalgas (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015).  Reemplazo de macroalgas cultivadas (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).	Rendimientos bajos (Milledge & Harvey, 2016).  Baja cantidad y calidad cuando son obtenidos del sargazo (Rodríguez Martínez, Van Tussenbroek, & Dahlgren, 2016).
Bio-sorción	Remoción de contaminantes y metales pesados (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).	Tecnología en desarrollo (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).
Fármacos	Producción de antivirales (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015). Producción de coagulantes (Milledge & Harvey, 2016). Producción de antimicrobianos (Milledge & Harvey, 2016).	Composición y periodicidad indefinidas (Milledge & Harvey, 2016). Área poco explorada con el sargazo (Milledge & Harvey, 2016).
Papel y otros compuestos químicos	Amigables con el ambiente. Bajo contenido de lignina para elaborar papel (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020).	Procesos poco eficientes y caros (Milledge, Nielsen, & Bailey, 2015). Bajo contenido de alginatos y poca información sobre el contenido de celulosa en el sargazo (Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek, 2020).

Una de las aplicaciones con grandes perspectivas de utilización en las macroalgas es el concepto de biorrefinería (Murphy, y otros, 2015) donde a partir del sargazo y diversos residuos orgánicos podría obtenerse fármacos, fertilizantes, biocombustibles y otros compuestos químicos; sin embargo, se requieren de una mayor investigación antes de considerar viable una biorrefinería con sargazo como principal materia prima (Milledge & Harvey, 2016).

### 2.5 Tecnologías para aprovechar el sargazo.

La selección de la tecnología debe considerar factores como: Cantidad y tipo de biomasa, forma de energía requerida, necesidades de la población, economía del proceso y factores específicos del proyecto a desarrollar (Mckendry, 2002). Las tecnologías para aprovechar la biomasa como biocombustible se dividen en dos grupos: Las tecnologías termoquímicas y las tecnologías bioquímicas. Dentro de las tecnologías termoquímicas podemos encontrar la combustión directa, pirólisis, gasificación y licuefacción hidrotérmica, mientras que por las tecnologías bioquímicas tenemos la transesterificación, la digestión anaeróbica y la fermentación (Kumar, y otros, 2016) y (Mckendry, 2002). A continuación, se describe brevemente las tecnologías de recolección, pretratamiento, preservación y aprovechamiento de sargazo.

### 2.5.1 Métodos de recolección.

Los métodos de recolección dependen de la disponibilidad de equipo, mano de obra, facilidades de acceso a la playa y vida silvestre que habite en las costas (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016). Los métodos de recolección pueden ser clasificados en tres grandes grupos: Recolección manual en la playa, recolección mecánica en la playa y recolección en el mar.

#### 2.5.1.1 Recolección manual.

Generalmente se utiliza para limpiar playas pequeñas con una cantidad relativamente baja de sargazo. Este tipo de recolección requiere una enorme cantidad de horas de trabajo, sin embargo, posee una gran flexibilidad para la recolección de sargazo en diferentes regiones (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016), además es el método que mejor se adapta al cuidado del medio ambiente ya que no fomenta la erosión de la playa ni la destrucción del ecosistema (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016).

#### 2.5.1.2 Recolección mecánica.

La recolección mecánica es una mejor opción para la limpieza de grandes volúmenes de sargazo en la playa, consume menos tiempo y esfuerzo que la recolección manual (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016). Los equipos utilizados son el rastrillo de playa mecánico, limpiadores de arena tamizada, cargadores frontales y cargadores de caña. El uso de maquinaria pesada compacta la arena de la playa afectando los nidos de tortugas, también fomenta la erosión de la playa y requiere una mayor inversión inicial para los equipos (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016).

#### 2.5.1.3 Recolección en mar.

Una forma sencilla para remover el sargazo del mar es utilizando barcos, los cuales se encargan de recolectar el sargazo antes de que llegue a las costas (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016). Este método de recolección evita los impactos negativos propios de la recolección mecánica en la playa (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016). En conjunto con la recolección del sargazo por medio de botes es posible utilizar barreras cuyo propósito es contener y concentrar el sargazo en un área específica del mar para que los barcos recolecten el sargazo de forma más eficiente (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016). Las ventajas de este método son la recolección y transporte simultaneo del sargazo desde el mar hasta la playa, por otra parte, su mayor desventaja es el uso de combustible fósil para el funcionamiento del barco (Vos, Foursoff, Bruijn, & Bruijn, 2016).

### 2.5.2 Pretratamientos y preservación del sargazo.

Antes de utilizar el sargazo o en general la biomasa existe una etapa de pretratamiento y/o preservación de la materia prima, a continuación, se describen los aspectos más relevantes de estas tecnologías.

#### 2.5.2.1 Preservación del sargazo.

Los dos principales métodos de preservación de sargazo son la deshidratación (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) y el ensilado (Milledge & Harvey, 2016).

La deshidratación es un pretratamiento que consiste en evaporar el agua contenida en la biomasa, demanda mucha energía por lo que se recomienda eliminar el agua mecánicamente en una primera fase antes de deshidratar (Milledge & Harvey, 2016). El aprovechamiento de la energía solar es una alternativa de bajo costo para la deshidratación, sin embargo, depende del volumen de sargazo a deshidratar y las condiciones climáticas del sitio (Milledge & Harvey, 2016).

El ensilaje es un pretratamiento que consiste en la fermentación anaerobia controlada de carbohidratos solubles para producir ácido láctico (Garcés Molina, Berrio Roa, Ruiz Alzate, Serna de León, & Builes Arango, 2004), su propósito es mantener estable la composición del material ensilado durante un largo tiempo acidificando el medio (Valencia Castillo, Hernández Beltrán, & López de Buen, 2011). El ensilaje ha sido utilizado en la especie de sargazo *S. muticum* concluyendo que es un método eficiente para preservar la macroalga especialmente para su uso como biogás ya que los rendimientos de metano no se reducen significativamente (Milledge & Harvey, 2016).

#### 2.5.2.2 Pretratamiento del sargazo.

Las tecnologías de pretratamiento se introducen antes de la tecnología principal, el objetivo del pretratamiento es facilitar la materia orgánica contenida en la biomasa para los microorganismos involucrados en el proceso. En (Thomson, Young, & Baroutian, 2019) y (Maneein, Milledge, Nielsen, & Harvey, 2018) se presentan varios pretratamientos aplicados a las macroalgas los cuales se clasifican en los siguientes grupos; físicos entre los que se encuentran la maceración, el golpeo, la reducción de tamaño, microondas y lavado; térmicos como el pretratamiento hidrotérmico y la explosión de vapor; químicos que incluyen los pretratamientos en medio básico y ácido; biológicos como los pretratamientos enzimáticos y con hongos. Cabe mencionar que el pretratamiento biológico con hongos ha sido utilizado en el sargazo del Caribe mexicano, presentando un aumento del 28% en su rendimiento de producción de metano (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).

#### 2.5.3 Tecnologías termoquímicas.

##### 2.5.3.1 Combustión directa.

La combustión consiste en quemar la biomasa en presencia de aire con el objetivo de convertir la energía química contenida en la biomasa en energía térmica, alcanzando temperaturas entre 800 °C y 1,000°C. Las macroalgas tienen un alto contenido de azufre y nitrógeno por lo que las emisiones de gases durante la combustión deben ser controladas (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). A pesar de que la combustión directa es el camino más fácil para transformar el sargazo en energía térmica, esta no representa una opción atractiva debido al alto contenido de humedad, cenizas y bajo poder calorífico del sargazo (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014).

##### 2.5.3.2 Pirólisis.

El proceso de pirólisis es la descomposición de los compuestos orgánicos para obtener biocombustible por medio del calentamiento de la biomasa seca en ausencia de aire a temperaturas que rondan los 500 °C (Mckendry, 2002). El proceso de pirólisis puede clasificarse como pirólisis lenta por medio de la cual se obtiene carbón y pirólisis rápida o flash con la cual se obtiene bio-aceite y/o gas de síntesis (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). El alto contenido de humedad, cenizas y nitrógeno hacen de las macroalgas una materia prima poco ideal para utilizarlas en el proceso de pirólisis, obteniendo bio-aceites con poder calorífico menor a los obtenidos con biomasa lignocelulósicas (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014).

### 2.5.3.3 Gasificación.

La gasificación es la conversión de la biomasa en gas de síntesis por oxidación parcial de la biomasa seca a temperaturas típicamente en el rango de 800 °C a 900 °C (Mckendry, 2002). El gas de síntesis está compuesto principalmente por H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). Una de las ventajas de la gasificación es su amplio rango de biomasa que pueden ser utilizadas como combustibles, las cuales pueden ir desde cultivos energéticos hasta residuos y desechos orgánicos. Se encuentran pocos datos de gasificación de macroalgas, sin embargo, Milldget, Smith, Dyer, & Harvey (2014) no recomiendan el procesamiento de macroalgas con gasificación debido al requerimiento energético para secarlas.

### 2.5.3.4 Licuefacción hidrotérmica.

Es un proceso con presiones medias (5MPa a 40MPa) y bajas temperaturas (200°C a 400°C) (Kumar, y otros, 2016) donde la biomasa es transformada en un combustible líquido (bio-aceite) en presencia de catalizador e hidrógeno (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). Los compuestos encontrados en el bio-aceite son cetonas, fenoles, alcoholes, ácidos grasos, ésteres y compuestos aromáticos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). El proceso de licuefacción hidrotérmica consiste a manera de resumen en la descomposición por hidrólisis de los principales componentes como son los polisacáridos, proteínas y lípidos a compuestos ligeros. Los polisacáridos se descomponen en monosacáridos, las proteínas se descomponen en aminoácidos y los lípidos en ácidos grasos y glicerina. Al mismo tiempo estas moléculas experimentan reacciones de condensación, ciclación y polimerización formando compuestos aceitosos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). Las macroalgas como el sargazo por su bajo contenido de lípidos y alto contenido de cenizas no son una opción viable para esta tecnología (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). El interés comercial en la licuefacción hidrotérmica es bajo debido a la complejidad de la corriente de alimentación y a sistemas más complejos y caros que los procesos con pirólisis y gasificación (Mckendry, 2002).

## 2.5.4 Tecnologías bioquímicas.

### 2.5.4.1 Transesterificación.

Típicamente el biodiésel es obtenido por transesterificación de triglicéridos derivados de los aceites vegetales, grasa animal (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015) o residuos de aceites utilizados para cocinar (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). La transesterificación es la reacción entre los lípidos con alcoholes de cadena corta principalmente metanol o etanol en presencia de un catalizador que puede ser NaOH o KOH, normalmente se utiliza un exceso de alcohol para asegurar la conversión total de las grasas a ésteres (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). Las macroalgas no son una materia prima adecuada para la producción de biodiésel por este método debido a su bajo contenido de lípidos el cual es típicamente de 0.3% a 6%, esta tecnología se enfoca más al uso de microalgas (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014).

### 2.5.4.2 Fermentación.

La fermentación consiste en utilizar microorganismos y enzimas para transformar las cadenas de carbohidratos en etanol (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016), esta tecnología no requiere de secado de la biomasa. Dentro de la tecnología debe considerarse el proceso de purificación para obtener el bioetanol el cual es un proceso que requiere de energía térmica (Mckendry, 2002). Las

macroalgas debido a su alto contenido de carbohidratos y bajo contenido de lignina son una materia prima prometedora para producir bioetanol (Kumar, y otros, 2016). La desventaja de utilizar macroalgas para producir bioetanol es la gran diversidad de polisacáridos como pueden ser los polisacáridos sulfatados, manitol, alginatos, agar, carragenanos entre otros (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014), esto representa la mayor limitante para su uso como materia prima ya que se debe encontrar microorganismos capaces de metabolizar esta compleja mezcla de carbohidratos de forma eficiente a bioetanol (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).

El bioetanol producido por macroalgas es del orden de 90 l/t de macroalga seca, este valor depende del tipo de macroalga utilizada y los pretratamientos aplicados, el valor es bajo comparada con cultivos terrestres como el maíz (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). La fermentación es una tecnología utilizada a gran escala para la obtención de bioetanol con cultivos terrestres (Mckendry, 2002), para la comercialización de bioetanol a partir de macroalgas café se requiere mayores eficiencias de conversión utilizando toda la variedad de carbohidratos disponibles (Kumar, y otros, 2016).

#### 2.5.4.3 Digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica consiste en la conversión del material orgánico en biogás principalmente constituido por metano y dióxido de carbono, la biomasa es transformada por bacterias en un ambiente anaeróbico (Mckendry, 2002). La tecnología esta comercialmente probada, además de que puede utilizar biomasa con alto contenido de humedad (Ciubota-Rosie, Gavrilescu, & Macoveanu, 2008) como el sargazo. El volumen total de biogás formado está relacionado con los sólidos volátiles contenidos en la biomasa los cuales se constituyen por carbohidratos, lípidos y proteínas (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). El rendimiento teórico de biogás en macroalgas puede ser alto, sin embargo, en la práctica el rendimiento es considerablemente menor al máximo teórico, esto debido a que hay sustancias que no son fácilmente degradables. Eficiencias de metano por digestión anaeróbica en macroalgas han sido reportadas en el rango de 0.14-0.40 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SV (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014) y de 0.12-0.48 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). El sargazo recolectado en las playas de Quintana Roo tiene una generación de 0.104 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV de acuerdo con Tapia-Tussell (2018) un valor relativamente bajo al compararlo con los valores reportados para macroalgas.

Durante la producción de biogás por digestión anaeróbica todos los compuestos orgánicos son degradados, lo que representa una ventaja respecto a otras tecnologías que solo trabajan con una parte de los compuestos orgánicos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). Varios grupos han evaluado a las macroalgas como una biomasa adecuada para la digestión anaeróbica, debido a su buena estabilidad en el proceso (Kumar, y otros, 2016), además el digestato (material remanente después de la digestión anaeróbica), contiene nitrógeno y fósforo, componentes que pueden ser utilizados como fertilizantes o como alimentación biológica a otro proceso (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). Otros aspectos importantes por mencionar sobre la digestión anaeróbica son su relativa sencillez y su uso demostrado para generar biogás a partir de macroalgas café (Murphy, y otros, 2015). La producción de biogás a partir de macroalgas es un proceso innovador y desafiante (Murphy, y otros, 2015) pero al mismo es el proceso más cercano a la comercialización (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014).

2.5.5 Resumen de tecnologías.

La tabla 2.2 presenta las ventajas y desventajas de las tecnologías aplicadas a las macroalgas para la producción de biocombustibles.

Tabla 2.2. Resumen tecnologías para generar biocombustibles a partir de macroalgas. Las referencias utilizadas son mencionadas en la tabla.

Tecnologías	Combustión directa	Pirólisis	Gasificación	Licuefacción hidrotérmica	Transesterificación	Fermentación	Digestión anaerobia
Uso total de la biomasa (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, Coastal seaweed solution, 2016).	si	si	si	si	no	no	si
Energía o combustible obtenido (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, Coastal seaweed solution, 2016).	Calor	Bio-aceite Gas de síntesis	Gas de síntesis	Bio-aceite	Biodiesel	bioetanol	biogás
Uso reportado en la literatura	no	no	Pocos datos reportados	no	no	si	sí
Obtención de otro producto	no	no	no	no	Posibilidad de utilizar el residuo después de extraer lípidos como sustrato para la digestión anaeróbica (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015).	Posibilidad de usar el residuo como sustrato para la digestión anaeróbica (Konda, Singh, Simmons, & Klein-Marcuschamer, 2015).	Fertilizante (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014) y (Farchverband Biogas, 2018)
Ventajas	-Proceso sencillo (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016).	-	-Amplio rango de biomazas a utilizar (Ciubota-Rosie, Gavrilesco, & Macoveanu, 2008). -Tiempos cortos para obtener biocombustible (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014).	-	-	-Alto contenido de carbohidratos (Kumar, y otros, 2016). -Bajo contenido de lignina (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). -Apta para biomazas con alto contenido de humedad (Ciubota-	-Proceso relativamente sencillo (Milledge & Harvey, 2016). -Bajos contenidos de lignina (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). -Apta para biomazas con alto contenido de

						Rosie, Gavrilesco, & Macoveanu, 2008).	humedad (Ciubota-Rosie, Gavrilesco, & Macoveanu, 2008). -Buena estabilidad de proceso (Kumar, y otros, 2016).
Desventajas	<p>-Materia prima poco ideal (Kumar, y otros, 2016) debido a su alto contenido de cenizas y humedad (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p> <p>-Alto contenido de S y N (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p> <p>-Bajo poder calorífico (Lorenzo Acosta &amp; Obaya Abreu, 2005).</p> <p>-Requiere secado (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p>	<p>-Bajo poder calorífico (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p> <p>-Alto contenido de humedad, cenizas, metales y nitrógeno hacen de las macroalgas una materia prima poco ideal (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p> <p>-Requiere secado (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p>	<p>-Requiere secado (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>-Altos contenidos de S (Thomson, Young, &amp; Baroutian, 2019).</p>	<p>-Alto contenidos de cenizas (Chen, Zhou, Luo, Zhang, &amp; Chen, 2015).</p> <p>-Bajos contenidos de lípidos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, &amp; Chen, 2015).</p> <p>-Sistema complejo (Mckendry, 2002).</p> <p>-Requerimientos energéticos para mantener P y T (Kumar, y otros, 2016).</p>	<p>-Requiere secado (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>-Bajo contenido de lípidos (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p>	<p>-Purificación de bioetanol requiere energía (Mckendry, 2002).</p> <p>-Rendimiento de bioetanol bajos comparados con cultivos terrestres (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p> <p>-Mezcla compleja de carbohidratos (Bastiaan, Willemijn, Lukas, &amp; Willem, 2016).</p> <p>-Bajo contenido de glucosa (Milldget, Smith, Dyer, &amp; Harvey, 2014).</p>	<p>-Tiempos largos para producir biogás (Kumar, y otros, 2016).</p> <p>-Altos contenido de nitrógeno (Chen, Zhou, Luo, Zhang, &amp; Chen, 2015).</p> <p>-Alto contenido de sales y metales alcalinos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, &amp; Chen, 2015).</p> <p>-Altos contenidos de S (Thomson, Young, &amp; Baroutian, 2019).</p>

## 2.6 Selección de tecnología.

El costo de producción de biocombustibles por macroalgas no es competitivo con combustibles provenientes de fuentes fósiles, utilizar las macroalgas únicamente con el objetivo de generación de biocombustible no es rentable, la industria de la macroalga debe generar productos adicionales a la energía (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). Las macroalgas por su alto contenido en carbohidratos se favorecen para generar bioetanol o biogás (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). A partir de la información recolectada y presentada en las secciones anteriores se utilizará el método matricial descrito por Anaya Durand, Barragán Acevedo, & Vergara Vega (2015) para seleccionar la tecnología más adecuada que permita utilizar explotar el sargazo. Para calificar las tecnologías se asigna una calificación del 1 al 4 para cada concepto a evaluar y se describe el criterio utilizado para su valoración. Las calificaciones son asignadas de acuerdo a lo reportado en la literatura y con base al criterio del estudiante. A continuación, se discute brevemente la asignación de la calificación a cada tecnología y en la tabla 2.8 se muestran los resultados de esta evaluación.

### 2.6.1 Uso total de la biomasa.

En la tabla 2.2 se presenta la transesterificación y la fermentación como las dos únicas tecnologías que no utilizan toda la materia orgánica disponible. El criterio de evaluación es el siguiente:

- (4) Tecnología con aprovechamiento de 3 biomoléculas (carbohidratos, proteínas y lípidos).
- (3) Tecnología con aprovechamiento de 2 biomoléculas.
- (2) Tecnología con aprovechamiento de 1 biomolécula.
- (1) No aplica.

La transesterificación utiliza únicamente los lípidos de la biomasa mientras que la fermentación usa solamente los carbohidratos, como consecuencia se asigna 2 puntos de calificación. Las combustión, pirólisis, gasificación, licuefacción hidrotérmica y digestión anaerobia aprovechan los carbohidratos, lípidos y proteínas de la biomasa por lo que se les asigna una calificación de 4 puntos.

### 2.6.2 Energía o combustible obtenido.

En México los biocombustibles con mayor relevancia son el bioetanol, el biodiésel y el biogás (Paredes Cervantes, Barahona Pérez, Barroso Tanoira, & Ponce Marbán, 2020). Existe un especial interés por el de bioetanol y biodiésel debido a su uso en el sector del transporte y a su posible comercialización, por lo que las leyes se centran más en los biocombustibles líquidos (CEDRSSA, 2020). Por otra parte, el biogás es el biocombustible con mayor potencial de desarrollo en México debido a la gran cantidad de desechos agroindustriales y de granjas; el biogás puede suplir las necesidades eléctricas de autoconsumo y vender los excedentes a la red eléctrica, generalmente su energía se aprovecha mediante sistemas de cogeneración (Paredes Cervantes, Barahona Pérez, Barroso Tanoira, & Ponce Marbán, 2020). El criterio de evaluación es el siguiente:

- (4) Biocombustible con interés de desarrollo en el país por su uso, apoyo por parte de las leyes y amplia disponibilidad de materias primas para su producción.
- (3) Biocombustible con interés de desarrollo en el país por su uso y con apoyo por parte de las leyes.

(2) Biocombustible con amplia disponibilidad de materias primas con poco apoyo del gobierno o leyes.

(1) Biocombustible sin interés de desarrollo, sin apoyo por parte de las leyes y sin disponibilidad de materias primas.

La fermentación, transesterificación y licuefacción hidrotérmica producen biocombustible líquido requerido en el sector del transporte y apoyado por las leyes en México, sin embargo, las materias primas que pueden ser utilizadas con estas tecnologías son más escasas comparadas con las que se pueden utilizar con la combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia, por lo que se le asigna una puntuación de 3.

Las materias primas para la producción de biocombustible a través de la combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia son más variadas y con mayor disponibilidad, pero con menor apoyo por parte del gobierno y las leyes por lo que se les asigna una calificación de 2.

### 2.6.3 *Uso reportado en literatura.*

Los procesos termoquímicos o procesos enfocados en el uso de lípidos han sido poco estudiados en el ámbito de las macroalgas y en específico del sargazo, esto debido a su alto contenido de humedad y baja concentración de lípidos. Por otra parte, la fermentación y la digestión anaerobia son tecnologías ampliamente estudiadas en el campo de las macroalgas, habiendo incluso plantas en operación de digestión anaerobia utilizando macroalgas (Thomson, Young, & Baroutian, 2019) y estudios específicos de la generación de biogás con sargazo del caribe mexicano (Tapia-Tussell, y otros, 2018). La digestión anaeróbica ha sido comercialmente probada utilizando biomásas con alto contenido de humedad (Ciubota-Rosie, Gavrilescu, & Macoveanu, 2008) y existen diversos autores que califican a esta tecnología como la más adecuada para utilizarse con macroalgas (Kumar, y otros, 2016). El criterio de evaluación es el siguiente:

(4) Tecnologías con estudios en macroalgas, con plantas en operación y comercialmente probadas.

(3) Tecnologías con estudios en macroalgas y comercialmente probadas.

(2) Tecnologías con estudios en macroalgas.

(1) Tecnologías sin estudios o pocos estudios en macroalgas.

La digestión anaerobia cuenta con estudios específicos del sargazo, plantas en operación y tecnología probada, por lo que se le asigna un puntaje de 4.

La fermentación cuenta con estudios en el ámbito de las macroalgas por lo que su calificación es de 2.

La combustión directa, pirólisis, gasificación, licuefacción hidrotérmica y fermentación en el ámbito de las macroalgas han sido poco estudiadas debido a las propiedades fisicoquímicas de las macroalgas por lo que la calificación asignada es de 1.

### 2.6.4 *Obtención de otro producto.*

En la literatura se encuentra reportado el uso de los residuos de la fermentación (Konda, Singh, Simmons, & Klein-Marcuschamer, 2015) y de la transesterificación (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015) como alimento para un proceso posterior de digestión anaeróbica. Para el caso de la

digestión anaerobia existe la posibilidad de utilizar el digestato para producir fertilizantes de calidad (Farchverband Biogas, 2018). El criterio de evaluación es el siguiente:

- (4) Tecnología con obtención de más de un producto y/o energía.
- (3) Tecnología con obtención de un producto y/o energía.
- (2) Tecnología sin obtención de producto y/o energía.
- (1) No aplica.

La fermentación, transesterificación y digestión anaerobia pueden obtener más de un producto y/o energía por lo que se asigna un puntaje de 4.

La combustión directa, pirólisis, gasificación y licuefacción hidrotérmica solo obtienen un producto y/o energía por lo que la calificación asignada es de 3.

#### 2.6.5 Complejidad del proceso.

Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) indican que la manera más sencilla de utilizar la biomasa es por medio de la combustión directa, así mismo Milledge & Harvey (2016) mencionan que la digestión anaeróbica es una tecnología relativamente sencilla de utilizar. Por otra parte, Mckendry (2002) describe la licuefacción hidrotérmica como una tecnología compleja y de poco interés comercial. El criterio de evaluación es el siguiente:

- (4) Tecnología poco compleja.
- (3) Tecnología ligeramente compleja.
- (2) Tecnología compleja.
- (1) Tecnología muy compleja.

La combustión directa por ser la forma más sencilla de aprovechamiento de biomasa se califica con 4.

La digestión anaerobia por tener una sencillez relativa (respecto a las otras tecnologías) se le asigna un puntaje de 3.

La pirólisis, gasificación, transesterificación y fermentación son tecnologías relativamente complejas respecto a la combustión directa y digestión anaerobia, por lo que su calificación es de 2.

En la literatura se encuentra a la licuefacción hidrotérmica como la tecnología más compleja respecto a las otras tecnologías, su calificación se considera de 1.

#### 2.6.6 Requerimiento de secado.

Los procesos con requerimiento de secado como la combustión directa, pirólisis, gasificación y transesterificación (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) impactan negativamente en el balance energético del proceso, por lo que su calificación es de 1. Los costos asociados al secado hacen que estas tecnologías sean poco viables para ser utilizados en macroalgas (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). La licuefacción hidrotérmica, fermentación y digestión anaerobia no requieren de un proceso de secado por lo que su puntaje es de 4. El criterio de evaluación utilizado es:

(4) Tecnologías que no requieren secado.

(3) y (2) No aplican.

(1) Tecnología que requiere secado.

#### 2.6.7 *Requerimiento de otro pretratamiento.*

Las tecnologías descritas en 2.5.3 y 2.5.4 requieren de un pretratamiento físico, químico, térmico o biológico del sargazo antes de ser utilizado (Thomson, Young, & Baroutian, 2019). Las tecnologías que requieren secado muchas veces necesitan de tratamientos físicos como la molienda para obtener el tamaño de partícula necesario para el proceso, estos procesos son relativamente sencillos y requieren poca inversión de energía. Las tecnologías como la digestión anaerobia y la fermentación a pesar de no requerir de un secado, si requieren de un pretratamiento para liberar el material orgánico que se encuentra dentro de la estructura celular de la biomasa, además de necesitar una disminución de tamaño por medio de la molienda y de lavado de materia prima (Maneein, Milledge, Nielsen, & Harvey, 2018). El criterio de evaluación es el siguiente (no se toma en cuenta el pretratamiento de secado):

(4) Tecnología sin requerimiento de pretratamiento.

(3) Tecnología con requerimiento de al menos un pretratamiento.

(2) Tecnología con requerimiento de al menos dos pretratamientos.

(1) Tecnología con requerimiento de más de dos pretratamientos.

La combustión, pirólisis, gasificación licuefacción hidrotérmica y transesterificación requieren de al menos un pretratamiento por lo que se les asigna una calificación de 3.

La fermentación y digestión anaerobia requieren de al menos 2 pretratamientos que generalmente es la reducción de tamaño combinado con un pretratamiento químico, térmico o biológico, por lo que su calificación se asigna de 2.

#### 2.6.8 *Sargazo como materia prima ideal.*

El alto contenido de humedad y cenizas (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014) en conjunto con la baja cantidad de lípidos del sargazo (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014) hacen de los procesos termoquímicos y de los procesos enfocados al aprovechamiento de lípidos tecnologías con muchas dificultades para utilizar el sargazo como materia prima. Por otra parte, se presenta a la digestión anaerobia y la fermentación como tecnologías aptas para aplicarse al sargazo debido a su tolerancia a la humedad y al aprovechamiento de carbohidratos, los cuales se encuentran presentes en el sargazo en grandes cantidades. El criterio de evaluación es el siguiente:

(4) Tecnología con mucha tolerancia a las propiedades fisicoquímicas del sargazo.

(3) Tecnología con tolerancia a las propiedades fisicoquímicas del sargazo.

(2) Tecnología con poca tolerancia a las propiedades fisicoquímicas del sargazo.

(1) Tecnología no apta para ser utilizada con sargazo.

La digestión anaerobia tolera la humedad presente en el sargazo, además de ser capaz de utilizar los carbohidratos, lípidos y proteínas que se encuentran contenidos en el mismo. Su bajo contenido de lignina es una ventaja para la etapa de hidrólisis en la digestión anaerobia y la gran cantidad de materias primas (incluidos desechos) con los que puede combinarse hacen del sargazo una materia prima ideal para esta tecnología, la calificación asignada es de 4.

La fermentación tolera la humedad del sargazo, pero tiene el inconveniente de únicamente utilizar los carbohidratos del sargazo y una menor cantidad de opciones para su mezclado en el proceso, por lo tanto, la calificación asignada es de 3.

La combustión directa, pirólisis y gasificación no toleran la humedad y el contenido de cenizas del sargazo, además de que desprenden una gran cantidad de gases dañinos como  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  debido a la composición del sargazo, el puntaje asignado es de 2.

La transesterificación y licuefacción hidrotérmica no son tecnologías aptas para su uso con el sargazo debido al bajo contenido de lípidos en la macroalga, el puntaje asignado es de 1.

#### 2.6.9 Método de recolección o cultivo.

El sargazo utilizado como materia prima nunca será cultivado. La recolección se realiza de la misma forma no importando la tecnología que se seleccione y en todos los casos se utilizará barcos sargaceros encargados de capturar el sargazo cuando este aún se encuentra dentro del mar. El criterio de evaluación es:

- (4) Recolección dentro del mar utilizando barcos.
- (3) Recolección manual una vez el sargazo se encuentre en las playas.
- (2) Recolección manual con maquinaria pequeña en playas.
- (1) Recolección con maquinaria pesada en playas.

Como el método de recolección será el mismo para el sargazo sin importar la tecnología, todas las tecnologías se les asigna una calificación de 4.

#### 2.6.10 Aprovechamiento de otras biomásas.

El estado de Yucatán posee diferentes tipos de biomásas las cuales pueden ser aprovechadas en conjunto con el sargazo recolectado. El estado de Yucatán tiene un gran número de granjas porcinas (Méndez Novelo, y otros, 2009), los residuos de estiércol y purines porcinos pueden ser utilizados en la digestión anaerobia para producir biogás de acuerdo con Murphy (2015). Otras materias primas que se encuentran disponibles durante todo el año y que también pueden ser utilizadas son el aserrín de pino, bagazo de henequén, fibra de coco y hoja de dzidzilche, estas materias primas pueden ser utilizadas principalmente en la digestión anaerobia y la gasificación debido a las propiedades presentadas por Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña (2018). También existen diversos residuos agrícolas en áreas cercanas a Quintana Roo y Yucatán como son las calabacitas, chile verde, elote, frijol, maíz, melón, pepino, sandía, sorgo de grano y tomate (SENER, 2018) las cuales pueden utilizarse para los procesos de fermentación, digestión anaerobia, gasificación e incluso combustión directa una vez hayan sido secados. Los criterios de evaluación son:

- (4) Tecnología con capacidad de aprovechar residuos porcícolas y agrícolas propios de la región.

(3) Tecnología con capacidad de aprovechar residuos agrícolas propios de la región.

(2) Tecnología con baja capacidad de aprovechar residuos agrícolas y porcícolas.

(1) Tecnología que no puede aprovechar ningún residuo propio de la región.

Las materias disponibles en Quintana Roo y en Yucatán favorecen el uso de la digestión anaerobia con capacidad de aprovechar tanto los residuos agrícolas como los porcícolas permitiendo tener una mayor flexibilidad en el proceso y no depender solamente de los arribazones de sargazo los cuales son difíciles de predecir, por otra parte, también es posible eliminar o disminuir los procesos de preservación de sargazo (deshidratación o ensilaje) mencionados en la sección 2.5.2.1 pues es posible contar con la disponibilidad continua de biomásas generadas durante todo el año en áreas relativamente cercanas a la planta, por lo tanto, se le asigna a la digestión anaerobia una calificación de 4.

La fermentación, combustión, pirólisis y gasificación tienen una gran capacidad para aprovechar los residuos agrícolas de la región, siendo la gasificación especialmente buena utilizando un amplio rango de biomásas (Ciubota-Rosie, Gavrilescu, & Macoveanu, 2008), debido a esto se asigna un puntaje de 3 a estas tecnologías.

Las materias primas para la generación de biodiésel se consideran escasas (Paredes Cervantes, Barahona Pérez, Barroso Tanoira, & Ponce Marbán, 2020), por lo que la licuefacción hidrotérmica y la transesterificación pueden utilizar con ciertas limitaciones los residuos agrícolas de la región, la calificación asignada para estas tecnologías es de 2.

#### *2.6.11 Integración de diversas tecnologías.*

La transesterificación y la fermentación solo utilizan una parte de la materia orgánica de la biomasa, por lo tanto, existe una parte de materia orgánica con potencial de ser aprovechado. Los residuos provenientes de estas tecnologías pueden ser utilizados como cosustratos por otra tecnología que aprovechen toda la materia orgánica como puede ser la digestión anaerobia. Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi (2015) y Konda, Singh, Simmons, & Klein-Marcuschamer (2015) mencionan la posibilidad de poder utilizar este enfoque para producir ya sea bioetanol y biogás o biodiésel y biogás. En el caso de la digestión anaerobia el digestato contiene los residuos inorgánicos y parte del material orgánico que no pudo ser transformado por el proceso anaeróbico, este material puede ser utilizado en conjunto con otras tecnologías para producir fertilizantes (Farchverband Biogas, 2018). Debido a que la producción de biodiésel con macroalgas no es posible, la mejor opción para combinar tecnologías es utilizar el sargazo solo o en conjunto con otra materia prima para obtener bioetanol, después utilizar los residuos de la fermentación como cosustrato con otra materia prima y generar biogás, por último, obtener un biofertilizante con el digestato producto de la digestión anaerobia. El criterio de evaluación es el siguiente:

(4) Integración de la tecnología principal para el aprovechamiento del sargazo con al menos dos tecnologías más.

(3) Integración de la tecnología principal para el aprovechamiento del sargazo con al menos una tecnología más.

(2) Utilización de una sola tecnología para el aprovechamiento del sargazo.

(1) Tecnología no apta para el aprovechamiento del sargazo.

La fermentación es la tecnología que aprovecha el sargazo y puede combinarse con la digestión anaerobia y el proceso de compostaje, por lo tanto, se asigna una calificación de 4.

La digestión anaerobia puede combinarse con el proceso de composta, entonces, el puntaje obtenido para esta tecnología es de 3.

La combustión, pirólisis, gasificación solo pueden utilizarse individualmente lo que nos lleva a asignarles un puntaje de 2.

La transesterificación y la licuefacción hidrotérmica no son tecnologías aptas para aprovechar el sargazo, por lo tanto, obtienen una calificación de 1.

#### 2.6.12 Rendimientos.

Para las tecnologías termoquímicas como la combustión, gasificación y pirólisis se utiliza el poder calorífico inferior para comparar la energía que es posible obtener por unidad de masa para las macroalgas. Se reportan en la literatura poderes caloríficos bajos para macroalgas respecto a cultivos terrestres (Mckendry, 2002). En la tabla 2.3 se presentan datos sobre el poder calorífico de cultivos terrestres, así como de macroalgas.

Tabla 2.3. Poder calorífico inferior para macroalgas y cultivos terrestres. Obtenido de Milldget, Smith, Dyer, & Harvey (2014); Milledge & Harvey; (2016); Deng (2020); Thermoflex.

Materia prima	LHV [MJ/kg]
Macroalgas secas	14-16
<i>L. digitata</i>	16
<i>L. latissima</i>	14
<i>S.natans</i>	12.2
<i>S.muticum</i>	12
Biomasa terrestre	17-20
Residuos de papel	7
Bagazo	16
Cascara de almendra	17
Huesos de aceituna	19
Cascara de pistache	18
Cascara de arroz	13
Paja de arroz	16
Tallos de alfalfa	16
Coque de petróleo	30
Carbón	20

Los rendimientos de la licuefacción hidrotérmica y transesterificación son muy bajos como es de esperarse para las macroalgas debido a su falta de lípidos (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). La tabla 2.4 presenta datos del rendimiento de biodiésel obtenido para el desecho de aceite de cocina, aceite de palma y el sargazo.

Tabla 2.4. Rendimiento en peso de biodiésel para desechos de aceite de cocina, aceite de palma y sargazo. Obtenido de Preeti & Akash Sambshio (2021); Guerrero Peña (2013); Hossein, Asadollah, Maryam, & Mortaza (2019).

Materia prima	Rendimiento [%w/w]
Desechos de aceite de cocina	65
Aceite palma africana	72
Sargazo	6

La fermentación presenta bajos rendimientos de etanol por tonelada de macroalga al compararse con la cantidad de etanol obtenida por cultivos terrestres (Milldget, Smith, Dyer, & Harvey, 2014). La tabla 2.5 presenta datos de bioetanol obtenido por tonelada de materia prima.

Tabla 2.5. Rendimiento de bioetanol para diversas materias primas y sargazo. Obtenido de Nwakaire, Ezeoha, & Ugwuishiwu (2013); Yeon, Seo, Choi, & Choi (2011); Vice Chairman, Asaoka, Atsumi, & Sakou (2007).

Materia prima	Rendimiento [l/t]
Macroalga general	90
<i>Sargassum</i>	38
<i>Sargassum sagamianum</i>	35
Granos de maíz	471
Rastrojo de maíz	428
Paja de maíz	416
Residuos de algodón	215
Aserrín de madera dura	382
Bagazo	422
Papel	440
Pasto varilla	366
Cebada	494
Trigo	487
Arroz	478
Papa dulce	204
Caña de azúcar	97

Kumar (2016) menciona que la digestión anaerobia de macroalgas tiene buenos rendimientos y Murphy (2015) sugiere el uso de macroalgas y en específico de macroalgas cafés a las cuales pertenece el sargazo, como materia prima con un gran potencial para ser utilizadas con esta tecnología debido a sus rendimientos de metano. La tabla 2.6 presenta el rendimiento de metano para macroalgas y la tabla 2.7 muestra el rendimiento de metano para otras materias primas.

Tabla 2.6. Rendimiento de metano para macroalgas. Obtenido de Murphy J. (2015); Tapia-Tussell (2018).

Macroalga	Rendimiento [l CH <sub>4</sub> /kg SV]
<i>H. elongate</i>	261
	202
<i>L. digitata</i>	218
	246
<i>F. serratus</i>	96
<i>S. latissima</i>	342
	335
	223
	220
	209
<i>A. nodosum</i>	166
<i>U. pinnatifida</i>	242
<i>S. polyschides</i>	255
	216
<i>S. miuticum</i>	130
<i>P. Palmata</i>	279
<i>G. verrucosa</i>	144
<i>S. natans/ S. fluitans</i>	104

Tabla 2.7. Rendimiento de metano para diferentes materias primas. Obtenido de SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ (2017).

Materia prima	Rendimiento [l CH <sub>4</sub> /kg SV]
Granos de cereal	370
Papas	380
Residuo destilado de manzana	330
Residuo destilado de papas	370
Granos destilados de cereales	380
Residuo del destilado de melazas	350
Suero de leche	350
Leche integral	450
Requesón	400
Restos de pan	400
Residuos de mercado	300
Residuo de semillas oleaginosas	450
Salvado de canola	450
Glicerina	350

Harina de pan	500
Harina de sangre	450
Residuos de alimentos	400

El criterio de evaluación para asignar calificación al rendimiento es el siguiente:

- (4) Rendimientos de sargazo superiores respecto a otras materias primas.
- (3) Rendimientos de sargazo dentro del rango de otras materias primas.
- (2) Rendimientos de sargazo bajos respecto a otras materias primas.
- (1) Rendimientos de sargazo muy bajos respecto a otras materias primas.

El poder calorífico inferior del sargazo presenta valores bajos respecto a otras materias primas presentadas en la tabla 2.3 por lo que se asigna una calificación de 2 a las tecnologías de combustión directa, gasificación y pirólisis.

Los rendimientos de biodiésel para el sargazo son muy bajos de acuerdo a los datos presentados en la tabla 2.4, por lo tanto, se asigna una calificación de 1 a las tecnologías de transesterificación y licuefacción hidrotérmica.

La fermentación presenta rendimientos muy bajos al compararlos con otros cultivos terrestres de acuerdo con lo presentado en la tabla 2.5, por lo que el puntaje asignado a esta tecnología es de 1.

La digestión anaerobia de macroalgas presenta rendimientos ligeramente bajos respecto a otras materias primas utilizadas con esta tecnología de acuerdo con lo presentado en las tablas 2.6 y 2.7, por lo tanto, se asigna una calificación de 2 a esta tecnología.

#### *2.6.13 Impacto ambiental de la tecnología.*

Los arribazones de sargazo en las playas de Quintana Roo son un problema que impacta la economía y el medio ambiente, pero no es el único problema que azota esta región de México. Las granjas porcinas localizadas en el estado de Yucatán y parte del estado de Quintana Roo generan una cantidad importante de desechos que contamina principalmente las reservas acuíferas del estado, Méndez Novelo (2009) indica que la contaminación causada por las granjas porcinas es constante y continuará en aumento. Los criterios de evaluación son los siguientes:

- (4) Tecnología que además disminuir el impacto ambiental negativo debido a los arribazones de sargazo impacta positivamente en al menos otras 2 áreas del medio ambiente.
- (3) Tecnología que además disminuir el impacto ambiental negativo debido a los arribazones de sargazo impacta positivamente en otra área del medio ambiente.
- (2) Tecnología que únicamente disminuye el impacto ambiental negativo debido a los arribazones de sargazo.
- (1) Tecnología que no disminuye el impacto negativo del sargazo o que disminuye el impacto ambiental negativo debido a los arribazones de sargazo, pero generando algún impacto negativo en otra área del medio ambiente.

Los residuos agrícolas, purines y estiércol porcino son materias primas que pueden ser tratadas mediante digestión anaerobia para la generación de biogás (Varnero, Muñoz, & Zúñiga, 2009); (Martínez Lozano, 2015). Murphy (2015) sugiere el uso en conjunto de macroalgas y purines para generar biogás, utilizar este desecho comúnmente producido en estos estados y que impacta negativamente al ambiente ayudará a mitigar parte del problema causada por la industria porcina al mismo tiempo que se atiende el problema generado por el sargazo. Además, el digestato producto de la digestión anaerobia ayuda a mejorar los suelos de la región y proporciona fertilizante orgánico, disminuyendo el uso de fertilizantes inorgánicos cuya producción daña el medio ambiente. Debido a lo anterior, la digestión anaerobia es capaz de afectar positivamente en al menos otras 2 áreas del medio ambiente por lo que la calificación asignada es de 4.

La fermentación y gasificación pueden tratar los residuos agrícolas de la región y disminuir el impacto negativo del sargazo, generando un impacto positivo en el medio ambiente por el tratamiento de residuos agrícolas, la calificación asignada para estas tecnologías es de 3.

La combustión directa y pirólisis son tecnologías con capacidad de tratar el sargazo y algunos desechos agrícolas, sin embargo, el uso inadecuado de estas tecnologías puede desprender gases dañinos a la atmosfera, especialmente en la combustión, por lo tanto, la calificación asignada es de 1.

La transesterificación y la licuefacción hidrotérmica no son aptas para tratar los purines porcinos, por lo tanto, el puntaje obtenido para estas tecnologías es de 1.

#### 2.6.14 Matriz selección de tecnología.

En la tabla 2.8 se presenta la evaluación de las tecnologías propuestas.

*Tabla 2.8. Evaluación de tecnologías para aprovechar los arribazones de sargazo en el caribe mexicano. Elaboración propia.*

Tecnologías	Combustión directa	Pirólisis	Gasificación	Licuefacción hidrotérmica	Transesterificación	Fermentación	Digestión anaerobia
Uso total de la biomasa	4	4	4	4	2	2	4
Energía o combustible obtenido	2	2	2	3	3	3	2
Uso reportado en la literatura	1	1	1	1	1	2	4
Obtención de otro producto	3	3	3	3	4	4	4
Complejidad del proceso	4	2	2	1	2	2	3
Requerimiento de secado	1	1	1	4	1	4	4
Requerimiento de otro pretratamiento	3	3	3	3	3	2	2
Sargazo como materia prima ideal	2	2	2	1	1	3	4

Método de recolección o cultivo	4	4	4	4	4	4	4
Aprovechamiento de otras biomásas (Flexibilidad)	3	3	3	2	2	3	4
Integración diversas tecnologías	2	2	2	1	1	4	3
Rendimientos	2	2	2	1	1	1	2
Impacto ambiental de la tecnología	1	1	3	1	1	3	4
TOTAL	32	30	32	29	26	37	44

Los resultados de la evaluación tecnológica colocan a la digestión anaerobia como la mejor opción para tratar los arribazones de sargazo. La segunda mejor tecnología encontrada es la fermentación y la tercera mejor opción es la gasificación. De acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 2.8 se selecciona a la digestión anaerobia como la tecnología para tratar los arribazones de sargazo del Caribe Mexicano.

## 2.7 Fundamentos de tecnologías utilizadas en el proceso.

### 2.7.1 Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en ausencia de oxígeno que requiere la acción coordinada de grupos de bacterias especializados en la degradación de una amplia variedad de materia orgánica (FAO, 2019), por ser un proceso en condiciones de anoxia las bacterias utilizadas en el proceso son sensibles o inhibidas por la presencia de oxígeno (Varnero Moreno, 2011). El biogás producto de la digestión anaerobia se compone principalmente por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y en menor medida otros gases, entre los que se destaca el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), un gas altamente tóxico (FAO, 2019). Las transformaciones químicas y físicas que sufre la materia orgánica en estos procesos no solo conducen a la producción de biogás, sino que además pueden generar un residuo estabilizado llamado digestato el cual tiene propiedades adecuadas para ser utilizado como biofertilizante (FAO, 2019). Cuando un sistema de biodigestión anaerobia utiliza diversos sustratos, el proceso se le denomina codigestión (FAO, 2019).

#### 2.7.1.1 Etapas de proceso anaeróbico.

La ecuación química genérica para todo el proceso de digestión anaeróbica es (Strezov & Evans, 2015):



El proceso de digestión anaeróbica se divide en 4 etapas descritas a continuación y presentadas en la figura 2.4.

Hidrólisis. La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolice en compuestos solubles que puedan atravesar la pared

celular (Varnero Moreno, 2011). Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas llamadas proteasas (Varnero Moreno, 2011), los lípidos son degradados por enzimas hidrolíticas llamadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol (Varnero Moreno, 2011) y los polisacáridos se degradan a monosacáridos (Strezov & Evans, 2015).

**Acidogénesis.** La etapa consiste en la fermentación del material orgánico soluble en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas como el ácido acético e hidrógeno (Varnero Moreno, 2011). También se generan distintos tipos de ácidos como el ácido propiónico, butírico, valérico y láctico, estos compuestos serán oxidados en la etapa acetogénica (Varnero Moreno, 2011). Dado que la acidogénesis es considerada la etapa más rápida del proceso global, resulta fundamental controlarla para evitar el descenso de pH (acidificación) e impedir interfiera con la acción del consorcio microbiano (FAO, 2019).

**Acetogénesis.** Los productos de la acidogénesis que no pueden ser tratados directamente por las bacterias metanogénicas, son oxidados a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono para poder ser transformados a metano (Strezov & Evans, 2015), las bacterias acetogénicas son las encargadas de llevar a cabo esta transformación (Varnero Moreno, 2011).

**Metanogénesis.** Los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano (Varnero Moreno, 2011). Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , metanol y algunas metilaminas (Varnero Moreno, 2011). Los microorganismos metanogénicos tienen dos vías metabólicas diferentes: la vía acetoclástica la cual transforma el ácido acético en  $CH_4$  y  $CO_2$ , y la vía hidrogenotrófica, en la cual a partir del  $H_2$  y  $CO_2$  se genera  $CH_4$  (FAO, 2019).

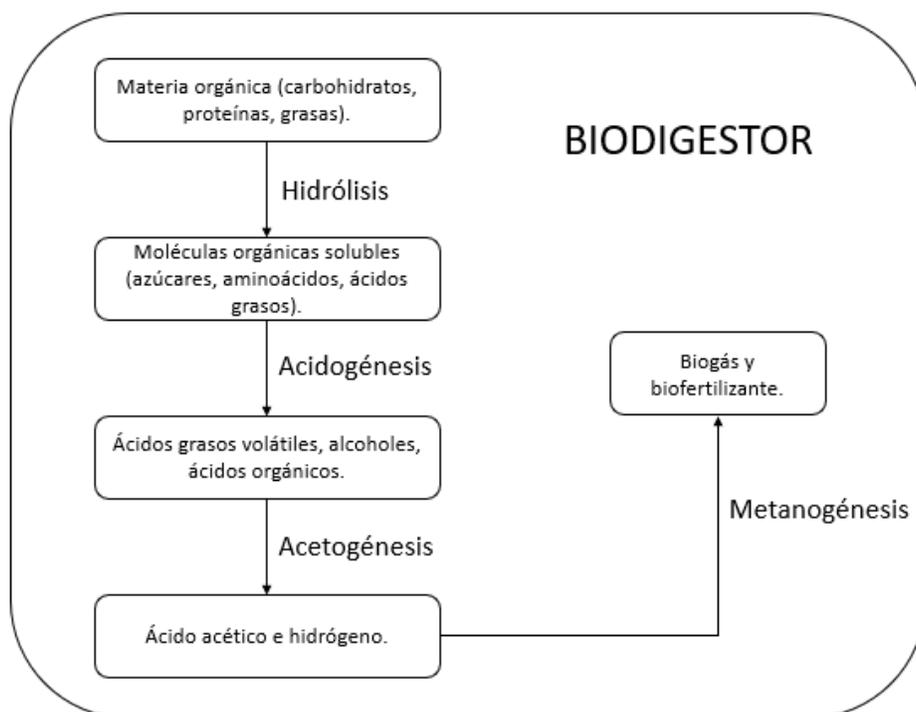


Figura 2.4. Etapas digestión anaerobia. Adaptado de FAO (2019).

### 2.7.1.2 Factores determinantes en la producción de biogás.

La producción de biogás y biofertilizante utilizando la digestión anaerobia es influenciada por los siguientes factores.

#### 2.7.1.2.1 Relación carbono-nitrógeno (C:N).

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para el crecimiento celular (FAO, 2019). Las bacterias dentro del proceso de digestión anaerobia consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Varnero Moreno, 2011). Un elevado contenido en carbono implica procesos más lentos, mientras que un elevado contenido de nitrógeno inhibe la actividad bacteriana debido a la producción de amonio (Varnero Moreno, 2011).

#### 2.7.1.2.2 Sólidos totales y sólidos volátiles.

Los sólidos totales (ST) se definen como la materia seca obtenida al secar una muestra de sustrato a 105°C durante 24 horas (FAO, 2019). El contenido de ST limita la movilidad de las bacterias en los sustratos y por lo tanto afecta la eficiencia del proceso (Varnero Moreno, 2011). El porcentaje de sólidos totales en biodigestores semicontinuos se encuentra entre 8% y 12% (Varnero Moreno, 2011). Los sólidos volátiles (SV) son la porción de sólidos totales que volatilizan al calentar la muestra por 6 horas a temperaturas mayores de 550°C (FAO, 2019), la producción de biogás está relacionada con la cantidad y disponibilidad de sólidos volátiles contenidos en los sustratos (FAO, 2019).

#### 2.7.1.2.3 Temperatura.

La temperatura de operación del biodigestor es considerada uno de los principales parámetros de diseño debido a la gran influencia de este factor en la rapidez de la digestión anaeróbica. De acuerdo a la temperatura los biodigestores pueden clasificarse en: Psicrófilos (10°C a 25°C), mesófilos (25°C a 40°C) y termófilos (40°C a 55°C) (FAO, 2019). El rango psicrófilo ha sido poco estudiado debido al enorme tamaño de biodigestor requerido y sus altos costos asociados (Varnero Moreno, 2011). El régimen mesófilo es el más utilizado, sin embargo, cada vez se está implementando más el rango termófilo para conseguir mayor rapidez en el proceso (Varnero Moreno, 2011). Es importante tener en cuenta que los biodigestores que trabajan en rangos termófilos son más sensibles e inestables frente a pequeñas variaciones en el proceso lo que puede inhibir la biodigestión. El proceso termófilo aumenta la solubilidad de la materia orgánica lo que supone un proceso de biodigestión más rápido, sin embargo, también se incrementa la solubilidad de compuestos tóxicos (FAO, 2019). Las ventajas de la digestión termófila son: Destrucción efectiva de patógenos, mayor crecimiento de bacterias metanogénicas, menores tiempos de residencia y mejor degradación de los sustratos (Al Seadi, y otros, 2008).

#### 2.7.1.2.4 Tiempo de retención hidráulico.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) indica el tiempo medio de permanencia del sustrato en el biodigestor sometido a la acción de los microorganismos y se define como el cociente del volumen del reactor y el caudal diario de carga (FAO, 2019). Esta variable determina el volumen del reactor y se encuentra directamente relacionada con la temperatura; mayor temperatura implica mayor

rapidez del proceso y TRH menores, valores bajos de TRH implican un menor volumen de reactor (Téllez Santana, 2008). Los procesos psicrófilicos pueden tener TRH de 50 a 120 días, los mesófilicos de 25 a 50 días y los termófilicos pueden ser de 12 a 25 días (FAO, 2019).

#### 2.7.1.2.5 Velocidad de carga orgánica.

La velocidad de carga orgánica (OLR) es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen. Es una medida de la capacidad de conversión biológica, determina la cantidad de sólidos volátiles que puede tolerar el sistema, una sobrecarga de SV provoca problemas de mezclado, incrementando los ácidos grasos volátiles, disminuyendo el valor de pH y finalmente inhibiendo el proceso (Strezov & Evans, 2015).

#### 2.7.1.2.6 Rango de pH.

El proceso de digestión anaeróbica es sensible a pequeños cambios en los valores de pH. Los diferentes grupos bacterianos en el proceso de digestión anaerobia presentan niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad, el pH óptimo para los diferentes grupos de bacterias presentes se encuentra en el rango de 6.8 a 7.4 (Varnero Moreno, 2011). Un pH menor a 6 genera un biogás pobre en metano debido a la reducción en la actividad de los microorganismos metanogénicos (Varnero Moreno, 2011). Por otra parte, un pH alto aumenta la formación de amoníaco compuesto inhibidor del crecimiento microbiano (Varnero Moreno, 2011).

#### 2.7.1.2.7 Potencial redox.

Para que los microorganismos metanogénicos se desarrollen a su plena capacidad, es necesario que se encuentren en un medio reductor. Los valores de potencial redox necesarios oscilan entre -370 y -220 mV (FAO, 2019).

#### 2.7.1.2.8 Inhibidores.

##### 2.7.1.2.8.1 Ácidos grasos volátiles.

En el sistema anaeróbico la concentración de ácidos grasos volátiles es relativamente baja, el aumento de los ácidos grasos volátiles representa un efecto tóxico en las bacterias metanogénicas lo que genera una acumulación de acetato e hidrógeno. Debido a la acumulación del hidrógeno su presión parcial aumenta e inhibe a las bacterias que degradan los ácidos, esto implica un aumento en la concentración de ácido y por lo tanto una disminución en el pH (Varnero Moreno, 2011).

##### 2.7.1.2.8.2 Oxígeno.

Las bacterias responsables de la hidrólisis y acidogénesis son anaerobias facultativas; es decir, sus vías metabólicas posibilitan recuperar energía tanto en la presencia como en la ausencia de oxígeno. Las cantidades de oxígeno que puede entrar en el reactor junto con el sustrato son rápidamente consumidas por esas bacterias, garantizando la ausencia de oxígeno. Sin embargo, la presencia de oxígeno puede ser tóxica para las bacterias metanogénicas las cuales son estrictamente anaeróbicas (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

#### 2.7.1.2.8.3 Nitrógeno amoniacal.

Las proteínas son la principal fuente de amonio en el proceso de digestión anaerobia. Una alta concentración de amoniaco inhibe a las bacterias metanogénicas. El aumento en la concentración de amoniaco libre está relacionado directamente con la temperatura, a mayor temperatura aumenta la concentración de amoniaco libre. Incrementar el pH y aumentar la temperatura provoca que el proceso sea inhibido por amoniaco (Al Seadi, y otros, 2008).

#### 2.7.1.2.8.4 Compuestos sulfurados.

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaeróbico, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido (Varnero Moreno, 2011). La forma más tóxica para las bacterias metanogénicas corresponde a la no ionizada ( $H_2S$ ), por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas. El  $H_2S$  no es muy soluble a altas temperaturas, por lo que en condiciones termofílicas se tiene un menor efecto inhibitorio (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

#### 2.7.1.2.8.5 Metales pesados.

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan mayor toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es  $Ni > Cu > Cr(IV) \sim Cr(III) > Pb > Zn$  (Varnero Moreno, 2011).

### 2.7.2 Purificación de biogás.

El biogás obtenido por digestión anaeróbica requiere de un proceso de purificación para evitar impactos negativos en la salud, medio ambiente y equipos de proceso (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010). Las principales tecnologías para el tratamiento del biogás se describen a continuación:

#### 2.7.2.1 Eliminación de $H_2S$ .

El contenido de  $H_2S$  típico en biogás se encuentra entre el 0,1 y el 0,5 % en volumen (1,000 a 5,000 ppmv), aunque se han alcanzado valores tan bajos como 0,0002 % y tan altos como 2 % (Arellano, y otros, 2017), los métodos para la eliminación de este gas se describen a continuación.

##### 2.7.2.1.1 Introducción de aire.

Es un método simple y de bajo costo que puede reducir la concentración del  $H_2S$  hasta menos de 50 ppm (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010). La técnica se basa en la oxidación biológica aerobia de  $H_2S$  a azufre elemental (S) y sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017) la cual consiste en la inyección de aire al biodigestor anaerobio en condiciones controladas para evitar el riesgo de explosión (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

#### 2.7.2.1.2 Adsorción química.

Las operaciones de adsorción se basan en la capacidad de ciertos sólidos de extraer con preferencia ciertas sustancias de una solución, concentrándola sobre su superficie (Ortega Viera, Rodríguez Muñoz, Fernández Sanatana, & Bárcenas Pérez, 2015). Los adsorbentes comúnmente utilizados para eliminar el H<sub>2</sub>S del biogás son las alúminas, carbón activado, óxido de hierro, óxido de zinc, hidróxido de hierro y cloruro de hierro (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010). El proceso de adsorción utilizando óxido de hierro comúnmente se denomina de esponja de hierro. Es posible dosificar el adsorbente de hierro directamente en el digestor para precipitar el H<sub>2</sub>S como FeS dentro del biodigestor y así evitar la presencia de H<sub>2</sub>S en el biogás (Arellano, y otros, 2017). El proceso de adsorción es altamente químico intensivo por lo que sus costos de operación suelen ser altos, además se genera la acumulación de una corriente continua de material de desecho agotado (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010).

#### 2.7.2.1.3 Absorción.

La absorción de H<sub>2</sub>S en medios líquidos puede ser física o química (Arellano, y otros, 2017). La absorción física del H<sub>2</sub>S utiliza agua como absorbente, el método más común es el llamado “water scrubbing” (Arellano, y otros, 2017). Dentro de la absorción química las aminas son de los absorbentes más eficientes (Ortega Viera, Rodríguez Muñoz, Fernández Sanatana, & Bárcenas Pérez, 2015).

#### 2.7.2.1.4 Separación por membranas.

El H<sub>2</sub>S puede ser separado del gas difundándolo a través de una membrana semipermeable, se utilizan membranas de absorción gas-líquido. Las moléculas de la corriente de gas fluyen en una dirección y se difunden a través de la membrana, estas son absorbidas por un líquido absorbente (NaOH) que fluye a contracorriente (Arellano, y otros, 2017). La remoción de H<sub>2</sub>S tiene una eficiencia de más del 98% y se puede obtener concentraciones menores a 250 ppmv (Arellano, y otros, 2017).

#### 2.7.2.1.5 Procesos biológicos.

La bio-desulfuración es el proceso en el cual se emplean microorganismos para remover azufre o compuestos de azufre, se basa en la capacidad de ciertos microorganismos aerobios azufre-oxidantes, como el *Thiobacillus thiooxidans* (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017) y *Thiobacillus ferrooxidans* para oxidar compuestos de azufre transformándolos en sustancias de fácil eliminación, como azufre elemental o sulfatos (Ortega Viera, Rodríguez Muñoz, Fernández Sanatana, & Bárcenas Pérez, 2015). El biofiltro percolador es un sistema utilizado en la bio-desulfuración el cual consiste en alimentar el biogás por el fondo de un reactor relleno de material inerte donde los microorganismos crecen en forma de biopelícula sobre el material de soporte. Se utiliza una solución acuosa la cual aporta los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos, la solución acuosa se alimenta por el domo a contracorriente del biogás (Arellano, y otros, 2017).

#### 2.7.2.2 Eliminación de siloxanos.

Los siloxanos son un grupo de compuestos orgánicos que contienen un enlace Si-O y radicales orgánicos (metil, etil y otros grupos orgánicos) unidos al átomo de silicio (SENER; SEMARNAT;

CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017). La adsorción de siloxanos con carbón activado, sílice gel, zeolitas y tamices moleculares es la principal técnica utilizada comercialmente (Arellano, y otros, 2017). El secado del biogás debe realizarse previamente a la etapa de adsorción de siloxanos pues a un mayor contenido de humedad menor es la eficiencia del adsorbedor de siloxanos (Arellano, y otros, 2017). El enfriamiento de 3°C a 12°C del biogás remueve parte de los siloxanos por lo que puede ser utilizado como un pretratamiento de eliminación de siloxanos antes del proceso de adsorción (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

#### 2.7.2.3 Eliminación de agua.

La cantidad de vapor de agua que el biogás puede contener depende de su temperatura, la humedad relativa del biogás es de 100% a la temperatura de operación del biodigestor (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017). Los métodos para la eliminación del agua están basados generalmente en la separación física y el secado químico (Arellano, y otros, 2017) a continuación se describen estas tecnologías.

##### 2.7.2.3.1 Secado por condensación.

El principio de este método se basa en la separación del condensado obtenido por enfriamiento del biogás por debajo del punto de rocío (Arellano, y otros, 2017). Para mejorar la cantidad de agua removida, además de la disminución de la temperatura se puede incrementar la presión (Pettersson & Wellinger, 2009). El agua condensada se recolecta en un separador de condensado (trampa de humedad o purgador) ubicado en el punto más bajo de la tubería de gas (Arellano, y otros, 2017).

##### 2.7.2.3.2 Secado por adsorción.

La adsorción utiliza como adsorbentes óxidos de aluminio y/o tamices moleculares, los adsorbentes se instalan en un lecho fijo y se operan a presiones de 6 a 10 bar (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

##### 2.7.2.3.3 Secado por absorción de agua en trietilenglicol.

La absorción con glicol es uno de los métodos más comunes para la deshidratación de gas. El proceso consiste en contactar el gas húmedo a alta presión a contracorriente con el líquido desecante en un absorbedor (Arellano, y otros, 2017). La solución pobre de trietilenglicol (TEG) entra por la parte superior de la columna y absorbe el agua del gas húmedo. El gas seco sale por la parte superior del absorbedor, mientras que la solución rica de TEG sale por el fondo y se regenera en la sección de regeneración de TEG (Arellano, y otros, 2017).

##### 2.7.2.3.4 Secado por absorción de sales higroscópicas.

En este caso, la sal se disuelve a medida que absorbe agua proveniente del biogás. La solución saturada de sal se extrae de la parte inferior del recipiente. En este proceso, la sal no se regenera y por esta razón se añaden nuevos gránulos de sal con la finalidad de reemplazar la sal disuelta de manera continua (Arellano, y otros, 2017).

### 2.7.3 Cogeneración.

Los sistemas que utilizan el calor desechado por el sistema para suplir demandas térmicas del proceso son llamados plantas de cogeneración (CHP) (Breeze, 2005) este tipo de plantas puede alcanzar eficiencias de cogeneración del 70% a 90% (Fraile, 2008). Las ventajas de la cogeneración son: Menor dependencia de combustibles fósiles, costo de producción menor, menor impacto ambiental y producción de energía en el lugar donde se consume (Fraile, 2008). El estudio de los sistemas de cogeneración debe comenzar por las necesidades de calor del proceso, tanto en cantidad como en tipo para que a partir de esa información se seleccione el tipo de máquina que suplirá la energía térmica al proceso (Fraile, 2008). Dentro de la cogeneración se define el motor primario como la máquina térmica que da origen al proceso de cogeneración como son los motores de combustión interna, turbinas de gas, celdas de combustible y calderas (Fraile, 2008). En función del tipo del motor primario se pueden definir diversos esquemas de cogeneración como pueden ser: Cogeneración con motor de combustión interna, con turbina de gas, con turbina de vapor, ciclo combinado en cogeneración y celdas de combustible.

#### 2.7.3.1 Trigeneración.

Se refiere a la generación simultánea de tres formas de energía, generalmente energía eléctrica, energía térmica como agua caliente o vapor y energía térmica para enfriamiento (Fraile, 2008).

### 2.7.4 Refrigeración por absorción de BrLi/ H<sub>2</sub>O.

El uso de enfriamiento por absorción ha sido limitado por su baja eficiencia si lo comparamos con el enfriamiento por compresión, sin embargo, el enfriamiento por absorción puede ser una opción viable debido a que puede utilizar el calor no aprovechado por otro proceso (Michael Somers, 2009), además de que requiere temperaturas relativamente bajas (<200 °C). La refrigeración por absorción se basa en la afinidad físico-química entre parejas de compuestos como el agua-bromuro de litio y agua-amoniaco, la sustancia más volátil actúa como refrigerante y la otra como absorbente (SDG, 1999). En la refrigeración por absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O el H<sub>2</sub>O actúa como refrigerante y LiBr como sustancia absorbente (SDG, 1999). El principio básico de operación del ciclo de refrigeración por absorción se describe a continuación: El calor es agregado en el generador (desorbedor) para separar el refrigerante en fase vapor y una solución líquida, posteriormente el refrigerante se envía al condensador donde rechaza calor y condensa. El refrigerante condensado es expandido mediante una válvula y después es evaporado utilizando la energía de la corriente a refrigerar. Por último, la solución líquida obtenida del generador es expandida por una válvula y enviada al absorbedor donde se recombina por absorción con el agua evaporada (Michael Somers, 2009). En la figura 2.5 se presenta el esquema del principio de operación del enfriamiento por absorción.

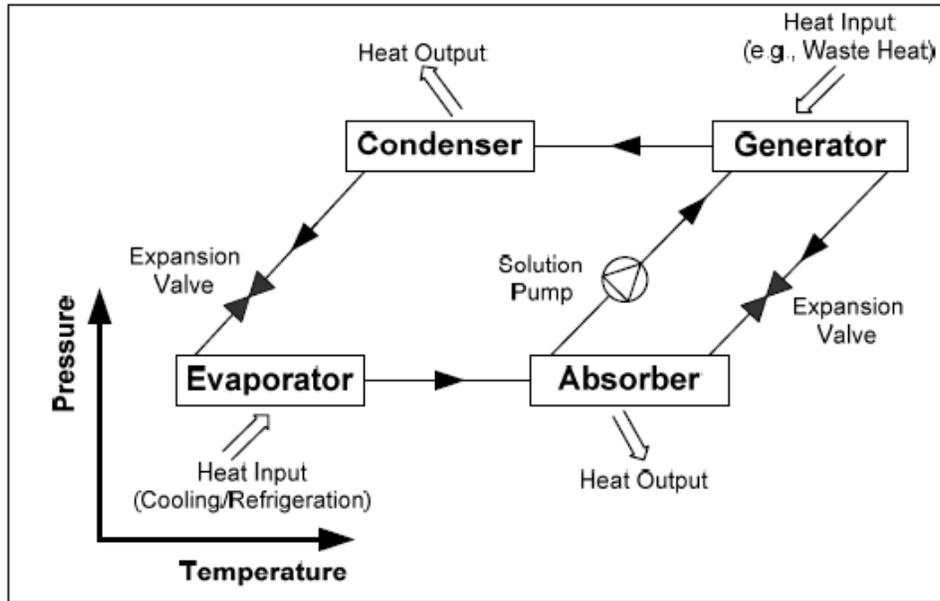


Figura 2.5. Esquema general de la refrigeración por absorción. Obtenida de Michael Somers (2009).

El equipo de absorción está formado por un recipiente de acero el cual contiene el condensador, evaporador, absorbedor y un generador de calor (SDG, 1999).

### 2.7.5 Proceso de composta.

El proceso de composta es la descomposición biológica y estabilización de la materia orgánica, bajo condiciones que permiten un desarrollo de temperaturas termofílicas como consecuencia de una producción biológica de calor, para dar un producto final estable, el cual puede ser aplicado al terreno para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes (Álvarez de la Puente, 2010). La descomposición de la materia orgánica es llevada a cabo en condiciones aeróbicas e incluye diferentes etapas las cuales deben cumplirse para generar composta de calidad (Román, Martínez, & Pantoja, 2013) estas etapas son:

**Fase mesofílica:** El proceso de composta inicia a temperatura ambiente, poco a poco la temperatura aumenta hasta los 45 °C debido a la actividad metabólica de los microorganismos mesofílicos (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Los microorganismos involucrados en esta fase utilizan fuentes sencillas de C y N degradando azúcares y aminoácidos (Álvarez de la Puente, 2010), elevan la temperatura y produce ácidos orgánicos que disminuyen el pH (Hernández, 2003).

**Fase termofílica o de higienización:** La fase termofílica inicia a temperaturas mayores a 45 °C, los microorganismos mesofílicos son sustituidos por microorganismo termofílicos (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Los microorganismos termofílicos degradan fuentes de carbono más complejas como ceras y polímeros (Álvarez de la Puente, 2010). Los microorganismos presentes en esta fase transforman el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH aumenta (Hernández, 2003). La fase también es conocida como fase de higienización ya que debido a las altas temperaturas se destruye bacterias como *E. Coli* y *Salmonella*, también elimina contaminantes como huevos de helminto, quistes, hongos y semillas de maleza (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

**Fase de enfriamiento:** Al agotarse las fuentes de carbono y nitrógeno la temperatura comienza a descender hasta los 40 °C, en esta fase continua la degradación de hemicelulosa y lignina por bacterias y hongos (*Aspergillus* y *Mucor*) (Álvarez de la Puente, 2010). Los organismos mesofílicos reinician su actividad (Hernández, 2003).

**Fase de maduración:** En esta fase se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonatados para formar ácidos húmicos y fúlvicos (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), también descende el consumo de oxígeno y desaparece la fitotoxicidad (Álvarez de la Puente, 2010). Se estabiliza y polimeriza el humus a temperatura ambiente (Álvarez de la Puente, 2010) este proceso puede durar meses.

La figura 2.6 presenta los principales aspectos asociados a las fases del proceso de composta.

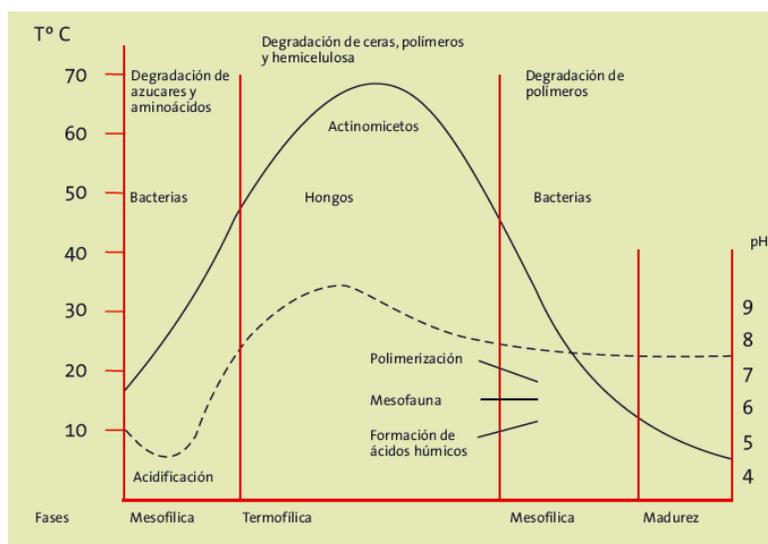


Figura 2.6. Fases del proceso de composta, evolución de la temperatura (línea continua) y pH (línea discontinua). Obtenido de Álvarez de la Puente (2010).

Las propiedades de la composta cambian en cada fase del proceso, en la tabla 2.4 se presenta el resumen de los parámetros en las diferentes fases del proceso de composta.

Tabla 2.4. Parámetros del proceso de composta. Obtenida de Román, Martínez, & Pantoja (2013).

Parámetro	Fase mesofílica	Fase termofílica	Maduración
C:N	25:1 a 35:1	15:1 a 20:1	10:1 a 15:1
Humedad	50% a 60%	45% a 55%	30% a 40%
Concentración de oxígeno	10%	10%	10%
Tamaño de partícula [cm]	<25	15	<1.6
pH	6,5-8,0	6,0-8,5	6,5-8,5
Temperatura [°C]	T ambiente a 45	45 a 60	T ambiente
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	250-400	<700	<700
Materia orgánica	50% a 70%	>20%	>20%

### 3. Delimitación del problema y alcance del proyecto.

#### 3.1 Problemática del sargazo en el caribe mexicano.

Los arribazones algales consisten en la llegada de grandes cantidades de macroalgas a las costas (figura 3.1), el fenómeno se ha presentado en el caribe mexicano, en los litorales del estado de Quintana Roo y específicamente en Cancún y Puerto Morelos. Los arribazones se presentan durante todo el año, pero la mayor afluencia se observa entre los meses de agosto a noviembre en Punta Cancún y de noviembre a febrero en Puerto Morelos. En años recientes los arribazones de sargazo han llegado masivamente a las costas del caribe causando un daño considerable a las economías locales y al medio ambiente (Milledge & Harvey, 2016). En el 2015 el caribe tuvo una afluencia diaria de 10,000 toneladas de sargazo diariamente, en este mismo periodo las costas del caribe mexicano recibieron en promedio 2,360 m<sup>3</sup> de sargazo por km de costa (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).



*Figura 3.1. Arribazones de sargazo en las costas del caribe mexicano. Obtenido de Torres Beristain (2019).*

Las principales áreas afectadas por los arribazones de sargazo son el sector turístico, pesquero y el medio ambiente. La industria del turismo depende en gran medida de la belleza de las playas, para el sector turístico los arribazones de sargazo son un problema que arruinan el atractivo visual de las playas, dificulta los traslados y desprende un olor desagradable debido a su descomposición (Dreckmann & Senties, 2013). Otro aspecto importante a considerar es la salud humana, la cual se ve comprometida por las emisiones de H<sub>2</sub>S producto de la descomposición del sargazo (Thomson, Young, & Baroutian, 2019). En la industria pesquera los arribazones de sargazo implican dificultades para desarrollar la actividad, los pescadores reportan entre sus problemas tener baja visibilidad, dificultad para manejar las redes de pesca, daños en los botes y bajas capturas de peces (Kumar, y otros, 2016). El medio ambiente también es altamente afectado por la llegada del sargazo, las grandes cantidades de sargazo disminuyen el oxígeno contenido en el agua y su descomposición libera compuestos tóxicos provocando la muerte de peces (Thomson, Young, & Baroutian, 2019). Las macroalgas promueven el blanqueamiento de los corales y por lo tanto la muerte del arrecife.

Para las tortugas el crecimiento masivo de las macroalgas implica una gran cantidad de alimento, sin embargo, una vez la macroalga se encuentra en las playas es perjudicial para el anidamiento de las tortugas (Thomson, Young, & Baroutian, 2019).

### 3.2 Caracterización del sargazo.

Las macroalgas son organismos multicelulares, no poseen verdaderas raíces, tallos, hojas o tejido vascular, pueden crecer en agua dulce o salada y pueden alcanzar tamaños de hasta 60 m de largo (Alaswad, Dassisti, Prescott, & Olabi, 2015). Basadas en su composición y pigmento pueden ser clasificadas en tres grupos: Cafés (*Phaeophyceae*), verdes (*Chlorophyceae*) y rojas (*Rhodophyceae*) (Rocca, Agostini, Giuntoli, & Marelli, 2015). La composición química de la macroalga varía dependiendo de la temporada y de los factores ambientales como la intensidad de la luz, temperatura, nutrientes y disponibilidad del CO<sub>2</sub> (Rocca, Agostini, Giuntoli, & Marelli, 2015). En la tabla 3.1 se presentan datos de composición para algunas especies de sargazo reportadas en la literatura.

Tabla 3.1. Composición proximal de algunas especies de *Sargassum*, porcentaje respecto a masa seca. Obtenido de Thomson, Young, & Baroutian (2019).

Especie	Cosechado	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	Fibra	Cenizas
<i>S. vulgare</i>	Brasil	67.8	15.8	0.5	7.7	14.2
<i>S. hemiphyllum</i>	Hong Kong	-	10.1	3.0	62.9	19.6
<i>S. polycystum</i>	Borneo	33.5	5.4	0.3	39.7	42.4
<i>S. platycarpum</i>	Puerto rico e Islas vírgenes	48.7	6.9	0.4	8.0	36.8
<i>S. rigidulum</i>	Puerto rico e Islas vírgenes	44.8	5.9	0.4	8.2	40.7
<i>S. lendigerum</i>	Puerto rico e Islas vírgenes	41.6	6.4	0.5	7.9	43.7
<i>S. mangarevense</i>	Tahití	-	13.2	3.4	42.8	30.6
<i>S. muticum</i>	Portugal	49.3	16.9	1.4	-	22.9
<i>S. polyschides</i>	Portugal	45.6	14.4	1.1	-	29.1

El sargazo encontrado en las playas del caribe mexicano corresponde a la especie *S. natans* y *S. fluitans* mostrado en la figura 3.2. Ambas macroalgas se reproducen vegetativamente y nunca se adhieren al suelo marino durante su ciclo de vida (Milledge & Harvey, 2016).

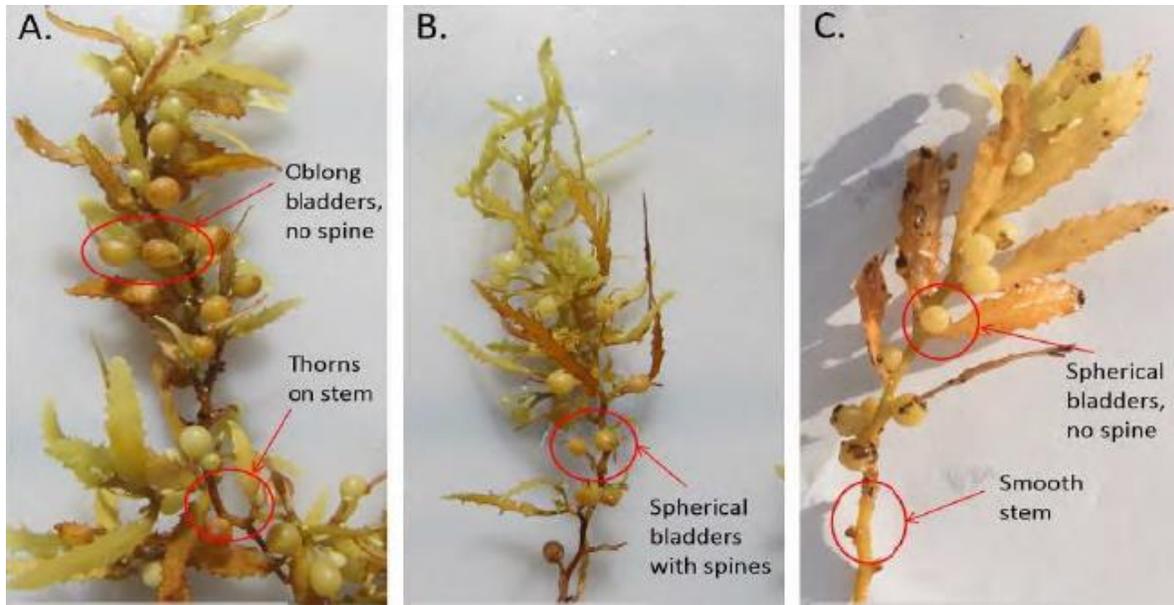


Figura 3.2. (A) *S. fluitans*, (B) y (C) *S. natans*. Obtenido de Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek (2020).

En la tabla 3.2 se presenta la composición para una mezcla compuesta por *S. fluitans* y *S. natans*.

Tabla 3.2. Composición mezcla de *S. natans* y *S. fluitans*. Obtenido de Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016) (2016).

Componentes	Porcentaje
Carbohidratos	57.3 +/- 0.21
Proteínas	15.4 +/- 0.00
Humedad	9.0 +/- 0.14
Cenizas	8.65 +/- 0.07
Fibra cruda	7.15 +/- 0.21
Lípidos	2.5 +/- 0.07

Milledge & Harvey (2016) mencionan que el sargazo contiene un porcentaje de 28.9% y 4% de carbono y nitrógeno respectivamente, esto significa que su relación C:N es de 7.2; las macroalgas generalmente tienen relaciones C:N menores a 20 (Rocca, Agostini, Giuntoli, & Marelli, 2015). Por otra parte, también se indica el LHV y HHV para el sargazo siendo de 9.7 kJ/g y 12.2 kJ/g respectivamente, estos valores caloríficos son menores a los reportados para cultivos energéticos terrestres los cuales están en el rango de 17-20 kJ/g, el menor poder calorífico de las macroalgas se atribuye a su alto contenido de cenizas (Milledge & Harvey, 2016). El contenido de sólidos totales para el sargazo es de 12.2% y el contenido de sólidos volátiles es de 86.4% de acuerdo con Manein, Milledge, Harvey, & Nielsen (2020). La composición de minerales y metales pesados del sargazo encontrado en el Caribe Mexicano se presenta en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3. Contenido de minerales en el sargazo del Caribe Mexicano en ppm respecto a la masa seca. Obtenido de Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek (2020).

Minerales	N	P	K	Mg	Ca	Fe	Zn	Cu	Mn	Al	Cl	Na	I
Sargazo Caribe Mexicano	-	228-401	1,990-46,002	2,915-16,662	23,723-136,146	<3-11	<5-17	<6-540	40-139	<140-517	747-53,101	-	-

Tabla 3.4. Contenido de metales pesados en el sargazo del Caribe Mexicano en ppm respecto a la masa seca. Obtenido de Desrochers, Cox, A. Oxenford, & Tussenbroek (2020).

Metales pesados	As Total	Cd	Hg	Pb	Cr
Sargazo Caribe Mexicano	24-172	<2	-	<2-3	<8

Los polisacáridos contenidos en las macroalgas cafés son diferentes a los encontrados en las plantas terrestres y contienen bajas cantidades de glucosa (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015). Los principales polisacáridos encontrados en las macroalgas cafés son: Laminarina, manitol, alginato, glucano, fucoidan y celulosa (Chen, Zhou, Luo, Zhang, & Chen, 2015); (Milledge & Harvey, 2016), (Apumayta Suárez, 2019); (Fernández Díaz, 2018); (Lahaye & Rochas, 1991); (Bonechi, y otros, 2017).

### 3.3 Alcance del proyecto.

#### 3.3.1 Objetivo del negocio.

El proyecto tiene como objetivo de negocio comercializar productos y/o servicios derivados del sargazo proveniente de las costas del caribe mexicano y de los diferentes residuos orgánicos de la región sur de México; específicamente de los estados de Oaxaca, Yucatán y Quintana Roo.

#### 3.3.2 Objetivos del proyecto.

El proyecto tiene por objetivo presentar una solución real al problema de los arribazones de sargazo en el Caribe Mexicano a través del desarrollo de la ingeniería conceptual para un proyecto que tenga como finalidad aprovechar el sargazo. Como consecuencia de una mejor disposición del sargazo, se pretende activar la industria turística y pesquera generando mayores ingresos para los estados afectados por el incorrecto manejo de los arribazones de sargazo.

#### 3.3.3 Descripción del alcance del proyecto.

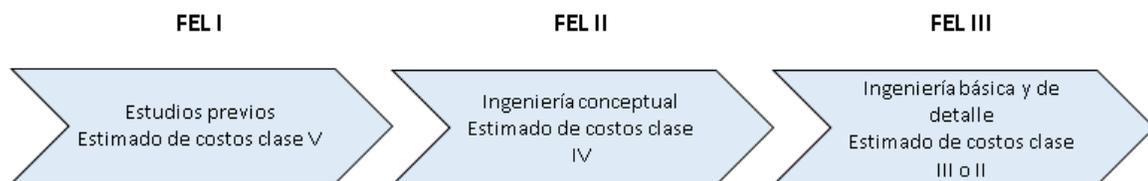
El alcance del proyecto consiste en el desarrollo de la ingeniería conceptual para el aprovechamiento del sargazo en las costas del Caribe mexicano utilizando información reportada en la literatura y culminando con un trabajo escrito con los resultados obtenidos. Los entregables de la ingeniería conceptual son:

- Descripción general del alcance del proyecto.
- Información del sargazo.
- Selección de tecnología.

- Capacidad de producción de la planta.
- Estudio de mercado.
- Localización de la planta.
- Estructura desglosada de trabajo (WBS).
- Programa maestro del proyecto.
- Tipo de contrato.
- FODA
- Descripción del proceso.
- Esquema de flujo de proceso.
- Lista de equipo.
- Simulaciones.
- Memoria de cálculo.
- Balances de materia y energía.
- Requerimientos de servicios auxiliares.
- Estimado de costos clase IV.
- Evaluación económica del proyecto.
- Análisis de sensibilidad.

No se incluyen las obras requeridas para edificios administrativos, ni la integración con áreas futuras de la planta. Al ser una planta nueva no hay integración con áreas existentes del proceso, también se considera no hay integración con alguna otra planta existente y/o cercana al proyecto desarrollado. No se incluye las instalaciones necesarias para el almacenamiento del producto y/o obras adicionales para el transporte de las materias primas como puentes y caminos.

El proyecto dentro de la metodología FEL se encuentra en el FEL II “conceptualización”, la etapa tiene como finalidad seleccionar la alternativa más viable y desarrollar los elementos técnicos de la propuesta a través de la ingeniería conceptual para generar un alcance definitivo (no detallado) y obtener la aprobación del presupuesto de ejecución (Basilio, 2017). En la siguiente figura se presenta la relación de la metodología FEL con el tipo de ingeniería desarrollada y el estimado de costos generado.



*Figura 3.3.* Relación de las etapas de la metodología FEL con el tipo de ingeniería desarrollada y la clase de estimado de costos generado (Biggeri & Soledad, 2018).

### 3.3.4 Estructura de desglose de trabajo (WBS).

La estructura de desglose de trabajo (WBS) organiza y define el alcance total del proyecto mediante su descomposición jerárquica, especificando los trabajos que deben ser realizados para alcanzar los

objetivos del proyecto y crear los entregables requeridos (Project management institute, 2017). A continuación, se presenta en la tabla 3.5 el WBS del proyecto.

Tabla 3.5. Estructura de desglose de trabajo (WBS). Elaboración propia.

EDT	Nombre de tarea
<b>1</b>	<b>Opciones tecnológicas para el aprovechamiento del sargazo en el caribe mexicano</b>
<b>1.1</b>	<b>Ingeniería conceptual</b>
1.1.1	Descripción general del alcance del proyecto
<b>1.1.2</b>	<b>Información del sargazo</b>
1.1.2.1	Problemática del sargazo en el Caribe mexicano
1.1.2.2	Caracterización del sargazo
1.1.2.3	Usos del sargazo
<b>1.1.3</b>	<b>Selección de la tecnología</b>
1.1.3.1	Tecnologías para aprovechar el sargazo
1.1.3.2	Matriz evaluación de tecnología
<b>1.1.4</b>	<b>Estudio de mercado</b>
1.1.4.1	Objetivo
1.1.4.2	Identificación del producto
1.1.4.3	Área de mercado
1.1.4.4	Análisis de la oferta y demanda
1.1.4.5	Comparación oferta vs demanda
1.1.4.6	Proyección de oferta y demanda
1.1.4.7	Determinación del precio para el producto
1.1.4.8	Estrategia de comercialización
1.1.4.9	Fuerzas de Porter
<b>1.1.5</b>	<b>Localización de la planta</b>
1.1.5.1	Disponibilidad y localización de materias primas
1.1.5.2	Disponibilidad mano de obra
1.1.5.3	Costo de vida
1.1.5.4	Costo de servicios industriales
1.1.5.5	Cercanía de consumidores
1.1.5.6	Costo de terreno
1.1.5.7	Impacto social y ambiental
1.1.5.8	Matriz evaluación de localización de sitio
1.1.6	Estructura de desglose de trabajo (WBS)
1.1.7	Programa maestro del proyecto
1.1.8	Tipo de contrato
1.1.9	FODA
1.1.10	Capacidad de la planta
<b>1.1.11</b>	<b>Descripción del proceso</b>
1.1.11.1	Pretratamiento de sargazo
1.1.11.2	Producción de biogás

1.1.11.3	Tratamiento de digestato
1.1.11.4	Tratamiento de biogás
1.1.11.5	Cogeneración
1.1.11.6	Refrigeración por absorción LiBr/H <sub>2</sub> O
<b>1.1.12</b>	<b>Esquema de flujo de proceso</b>
1.1.12.1	Pretratamiento de sargazo
1.1.12.2	Producción de biogás
1.1.12.3	Tratamiento de digestato
1.1.12.4	Tratamiento de biogás
1.1.12.5	Cogeneración
1.1.12.6	Refrigeración por absorción LiBr/H <sub>2</sub> O
<b>1.1.13</b>	<b>Lista de equipo</b>
1.1.13.1	Pretratamiento de sargazo
1.1.13.2	Producción de biogás
1.1.13.3	Tratamiento de digestato
1.1.13.4	Tratamiento de biogás
1.1.13.5	Cogeneración
1.1.13.6	Refrigeración por absorción LiBr/H <sub>2</sub> O
<b>1.1.14</b>	<b>Simulaciones</b>
1.1.14.1	Tratamiento de biogás
1.1.14.2	Cogeneración
1.1.14.3	Refrigeración por absorción LiBr/H <sub>2</sub> O
<b>1.1.15</b>	<b>Memorias de cálculo</b>
<b>1.1.15.1</b>	<b>Pretratamiento de sargazo</b>
1.1.15.1.1	Tanque de lavado V-101
1.1.15.1.2	Molino M-101
1.1.15.1.3	Tanque de pretratamiento V-102
1.1.15.1.4	Tanque de homogenización V-103
<b>1.1.15.2</b>	<b>Producción de biogás</b>
1.1.15.2.1	Biodigestor V-201
1.1.15.2.2	Cálculo energético biodigestor V-201 e intercambiador E-201
<b>1.1.15.3</b>	<b>Tratamiento de digestato</b>
1.1.15.3.1	Proceso de composta
1.1.15.3.2	Flujos másicos y concentración de SV para la fracción líquida del digestato
1.1.15.3.3	Tanque de aireación V-401
1.1.15.3.4	Clarificador V-402
<b>1.1.15.4</b>	<b>Cogeneración</b>
1.1.15.4.1	Parámetros de cogeneración
<b>1.1.16</b>	<b>Balances de materia y energía</b>
1.1.16.1	Pretratamiento de sargazo
1.1.16.2	Producción de biogás
1.1.16.3	Tratamiento de digestato

1.1.16.4	Tratamiento de biogás
1.1.16.5	Cogeneración
1.1.16.6	Refrigeración por absorción LiBr/H <sub>2</sub> O
1.1.17	Requerimientos de servicios auxiliares
<b>1.1.18</b>	<b>Estimado de costos</b>
1.1.18.1	Tipos de estimado de costos
1.1.18.2	Selección del estimado de costos
1.1.18.3	Información técnica disponible
1.1.18.4	Herramientas disponibles
<b>1.1.18.5</b>	<b>Simulación en Aspen Capital Cost</b>
1.1.18.5.1	Consideraciones especiales en la simulación
1.1.18.6	Integración de costo directo
1.1.18.7	Integración de sobre costo
1.1.18.8	Contingencia
1.1.18.9	Escalación
1.1.18.10	Estimado de costos clase IV
<b>1.1.19</b>	<b>Evaluación económica del proyecto</b>
1.1.19.1	Costos
1.1.19.2	Ingresos
1.1.19.3	Depreciación
1.1.19.4	Impuestos y reparto de utilidades
1.1.19.5	Capital de trabajo
1.1.19.6	INPC
1.1.19.7	Inversión total
1.1.19.8	Valor terminal
1.1.19.9	Precio de la composta y electricidad
1.1.19.10	Tasa de descuento
1.1.19.11	Flujo de efectivo
1.1.19.12	Análisis de sensibilidad

## 4. Propuesta de proyecto para el aprovechamiento del sorgazo.

### 4.1 Estudio de mercado.

El objetivo de un estudio de mercado es determinar la cantidad de bienes y/o servicios provenientes de una nueva unidad productora que, en una cierta área geográfica y bajo determinadas condiciones la comunidad estaría dispuesta a adquirir para satisfacer sus necesidades, en las siguientes secciones se realiza el estudio de mercado de acuerdo a la estructura presentada en (Núñez Jiménez, 1997).

#### 4.1.1 Objetivo.

Conocer la situación del mercado para los fertilizantes orgánicos e inorgánicos en México e identificar las principales oportunidades y problemas para su comercialización. Determinar la viabilidad de introducción de un nuevo fertilizante orgánico en la región sur de México.

#### 4.1.2 Identificación del producto.

El producto generado en la planta es un compost maduro con un tiempo de proceso de composta de 4 meses producido a partir de sorgazo, purines porcinos y residuos agrícolas recolectados en los estados de Quintana Roo y Yucatán. El producto está dirigido a los agricultores que desarrollan la agricultura orgánica y/o para aquellos agricultores que requieran mejorar las propiedades del suelo donde realizan sus actividades. La composta es un tipo de biofertilizante producido a partir de materiales orgánicos que mediante un proceso aerobio se transforma en un material de textura terrosa, olor agradable y sin patógenos (Guzmán Flores, 2018). El compost contribuye a mejorar las condiciones físicas del suelo, aporta nutrientes y estimula el crecimiento de las plantas (Guzmán Flores, 2018). El contenido de humedad en el producto final es de 35.5% con un porcentaje de materia orgánica respecto al material seco de 77.64%, la presentación del producto para su comercialización será en costales de rafia con capacidades de 30, 40 y 50 kg. La composta puede utilizarse para diferentes fines a continuación se listan los usos que se le puede dar al producto (Amigos de la tierra, 2009):

1. Abono para huertos, praderas, jardines y campos agrícolas (Guzmán Flores, 2018): Se sugiere aplicar de 0.5 a 4 kg de compost por m<sup>2</sup> de superficie a fertilizar, esta cantidad varía dependiendo de los cultivos. En la tabla 4.1 se presentan las cantidades de composta que se sugiere aplicar para algunos cultivos.

Tabla 4.1. Dosis de aplicación de compost para cultivos. Obtenido de Ambientum (s.f.) y Servicio agrícola y ganadero región Atamaca (2017).

Cultivos	Aplicación de composta
Arroz	1.5 a 5 kg/m <sup>2</sup> Aplicar 1 o 2 meses antes de la siembra
Viticultura	2 a 4 kg/m <sup>2</sup> Aplicar después de la recolección

Praderas y cultivos forrajeros	2.5 a 4 kg/m <sup>2</sup> Aplicar previo a la plantación
Cultivos leguminosos	0.3 kg/m <sup>2</sup> por año
Zanahoria, ajo, cebolla y cultivos frutales	0.6 kg/m <sup>2</sup> por año
Hortalizas	1 a 2 kg/m <sup>2</sup> por año
Suelos pobres	Utilizar más de 2 kg/m <sup>2</sup> al año

2. Abono de semilleros: El compost se aplica en partes iguales con tierra esponjosa y arena.
3. Abono de macetas: El uso del compost se realiza aplicando en partes iguales de compost con tierra vegetal y vermiculita o perlita.
4. Abono para árboles: Aplicar capa de 2 cm de compost en el área cercana al tronco.
5. Té de compost: Introducir el compost dentro de un saco en un recipiente con agua por una noche, se procede a regar las plantas con el líquido rico en nutrientes.
6. Estabilización de taludes.
7. Recuperación de terrenos empobrecidos.
8. Sustrato y soporte orgánico a las superficies.
9. Contrarrestar la erosión.
10. Aplicación en filtros de tierra para evitar malos olores.
11. Protección de cultivos contra heladas.

La composta se clasifica de acuerdo con su uso como un producto intermedio (Núñez Jiménez, 1997) ya que se utiliza en el proceso productivo del sector agrícola. Por otra parte, la composta también se clasifica por su efecto como un producto sustituto ya que su aplicación puede sustituir y/o desplazar el consumo de fertilizantes inorgánicos (Núñez Jiménez, 1997).

La densidad económica se entiende como la relación de precio, peso y distancia del producto (Herrera López, 2016). La composta tiene un precio bajo y su peso es relativamente alto, esto significa que el producto solo puede cubrir mercados cercanos al punto de producción, por lo tanto, la composta se clasifica como un producto con una densidad económica baja.

A continuación, se listan las principales leyes y normas que deben ser tomadas en consideración para un correcto proceso productivo y de comercialización de la composta.

- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos.
- Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente.
- Ley para la gestión integral de los residuos en el estado de Yucatán.
- Ley de protección del medio ambiente del estado de Yucatán.
- Norma NMX-AA-180-SCFI-2018 referente a los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica en los residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.
- Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 referente a los lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

- Norma NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.
- Norma NADF-020-AMBT-2011 que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el distrito federal.
- Norma NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos.

#### 4.1.3 Área del mercado.

La composta es un producto de baja densidad económica por lo que el mercado para comercializar el producto debe estar lo más cerca posible al lugar de producción. Las posibles regiones para su comercialización son el estado de Quintana Roo, Yucatán, Chiapas y Oaxaca, siendo Chiapas y Oaxaca estados líderes en producción agrícola de México (Hablemos del campo, 2018). De acuerdo con García Salazar, Borja Bravo, & Rodríguez Licea (2018) el uso de fertilizantes aumenta al aumentar el tamaño del predio, los ingresos del productor, el grado de mecanización, subsidios por parte de PROCAMPO y el nivel educativo, también aumenta su uso al disminuir el precio de los fertilizantes. En los estados del norte como Sonora y Sinaloa el uso de fertilizantes en el proceso es mayor a un 94%, sin embargo, en los estados del Sur como Oaxaca el uso de fertilizantes es menor al 50% (García Salazar, Borja Bravo, & Rodríguez Licea, 2018). En la tabla 4.2 se presenta el ingreso corriente total promedio al trimestre por hogar para los estados donde se comercializará la composta y su lugar relativo respecto a los otros estados.

Tabla 4.2. Ingreso total corriente al trimestre por hogar en el 2018 en MXN. Obtenido de INEGI (2018).

Lugar	Entidad federativa	Ingreso total corriente
9	Quintana Roo	\$ 56,711.00
14	Yucatán	\$ 49,879.00
30	Oaxaca	\$ 31,592.00
32	Chiapas	\$ 26,510.00

El estado de Quintana Roo y Yucatán presenta un buen nivel de ingresos lo que representa una mayor posibilidad para la compra de fertilizantes. Los bajos ingresos de los estados de Oaxaca y Chiapas se traducen en menos capital por parte de los agricultores para la compra de fertilizantes, por lo que se pretende ofrecer un precio más accesible respecto a los fertilizantes inorgánicos para poder abordar el mercado en esta área geográfica.

#### 4.1.4 Análisis de la demanda.

La composta puede clasificarse dentro de la demanda y de acuerdo con su necesidad como un bien básico para la sociedad debido a que se encuentra relacionado con la alimentación humana al proporcionar los nutrientes para el crecimiento de los cultivos. También puede considerarse un

producto de demanda continua con tendencia al alza de acuerdo con Gaucín (2016) presentando un incremento en la demanda del 1.6 % en las últimas décadas. De acuerdo con su destino la composta se clasifica como de demanda intermedia ya que es un producto utilizado en el proceso productivo de la industria agrícola. Por último, de acuerdo con la estructura del mercado la composta y en general los biofertilizantes son un producto sustituto a las importaciones de fertilizantes aumentando la producción nacional de los mismos.

La producción de fertilizantes en México en 2018 fue de 1.89 millones de toneladas y se compone principalmente de fertilizantes fosfatados 60%, nitrogenados 28.3% y ácidos 11.7% (GCMA, 2020). En el 2018 el país produjo el 35% de la demanda total de fertilizantes, el porcentaje restante se obtiene de las importaciones (GCMA, 2020). En la tabla 4.3 se presenta la demanda de los fertilizantes en México calculada como la suma de la producción más importaciones menos las exportaciones (Núñez Jiménez, 1997) y en la figura 4.1 se presenta la gráfica de los datos tabulados.

*Tabla 4.3. Demanda aparente y superficie sembrada de fertilizantes fosfatados, NPK y nitrogenados. Datos obtenidos de SEMARNAT (2014) y GCMA (2020).*

<b>Año</b>	<b>Producción nacional [t]</b>	<b>Importación [t]</b>	<b>Exportación [t]</b>	<b>Demanda aparente [t]</b>	<b>Superficie sembrada [miles de ha]</b>
1996	4,398,410.00	708,470.00	1,458,540.00	3,648,340.00	21,338,942.00
1997	3,394,410.00	1,014,090.00	1,112,170.00	3,296,330.00	22,109,590.00
1998	3,006,810.00	1,590,220.00	1,180,620.00	3,416,410.00	21,981,383.00
1999	2,345,020.00	1,767,190.00	949,110.00	3,163,100.00	21,980,375.00
2000	1,424,850.00	2,100,450.00	616,190.00	2,909,110.00	21,780,047.00
2001	1,275,870.00	2,164,460.00	626,700.00	2,813,630.00	21,607,967.00
2002	643,690.00	2,265,440.00	162,000.00	2,747,130.00	21,664,018.00
2003	635,260.00	2,361,580.00	20,280.00	2,976,560.00	21,754,412.00
2004	807,730.00	2,483,460.00	9,150.00	3,282,040.00	21,874,034.00
2005	753,110.00	2,525,500.00	17,870.00	3,260,740.00	21,640,072.00
2006	692,160.00	2,524,090.00	230,560.00	2,985,690.00	21,436,172.00
2007	984,689.00	2,492,413.00	280,798.00	3,196,304.00	21,733,230.00
2008	1,102,821.00	2,045,250.00	662,270.00	2,485,801.00	21,902,572.70
2009	1,673,126.00	2,772,207.22	791,630.39	3,653,702.83	21,832,754.02
2010	1,733,175.00	3,724,154.61	677,134.38	4,780,195.23	21,952,745.02
2011	1,837,709.00	3,335,185.57	270,263.15	4,902,631.42	22,136,741.58
2012	1,953,350.00	3,246,864.87	1,014,646.13	4,185,568.74	21,901,600.26
2013	2,124,020.00	3,559,987.07	987,682.46	4,696,324.61	22,113,662.82

2014	1,877,940.00	3,559,987.07	927,328.94	4,510,598.13	22,202,784.03
2015	1,881,887.00	2,613,067.00	50,914.00	4,444,040.00	-
2016	1,786,195.00	2,965,255.00	26,942.00	4,724,508.00	-
2017	1,925,264.00	3,126,766.00	20,704.00	5,031,326.00	-
2018	1,889,387.00	3,504,510.00	3,738.00	5,390,159.00	-

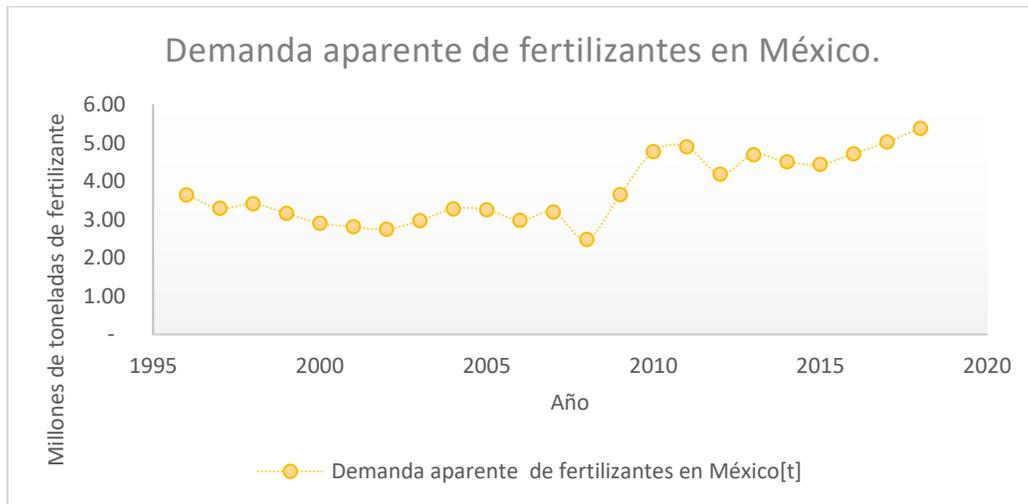


Figura 4.1. Demanda aparente de fertilizantes desde 1995 hasta 2018. Datos obtenidos de SEMARNAT (2014) y GCMA (2020).

De acuerdo con la figura 4.1 la demanda tiene una tendencia creciente conforme se avanza en el tiempo.

#### 4.1.5 Análisis de la oferta.

El mercado de fertilizantes en México opera prácticamente sin regulaciones de precio y calidad, por lo que fabricantes y distribuidores son los que determinan los precios que rigen en el mercado (CDRSSA, 2019). La oferta de fertilizantes del país se puede clasificar como una oferta oligopólica (Morales Paredes & Pico López, 2009) debido a que el número de ofertantes relevantes en el mercado es reducido comparado con la demanda comercial, por lo tanto, los proveedores de fertilizantes tienen poder en el mercado y la capacidad de influir en el precio del producto (Nicolé Roldán, s.f.).

En Mexico Red (s.f.) se tiene el registro de 241 proveedores de fertilizantes de los cuales 97 proveen fertilizantes orgánicos, todos los proveedores registrados se localizan en el norte y centro de México. En la figura 4.2 se presenta la distribución de unidades económicas en fabricación de fertilizantes y diversos agroquímicos en México.

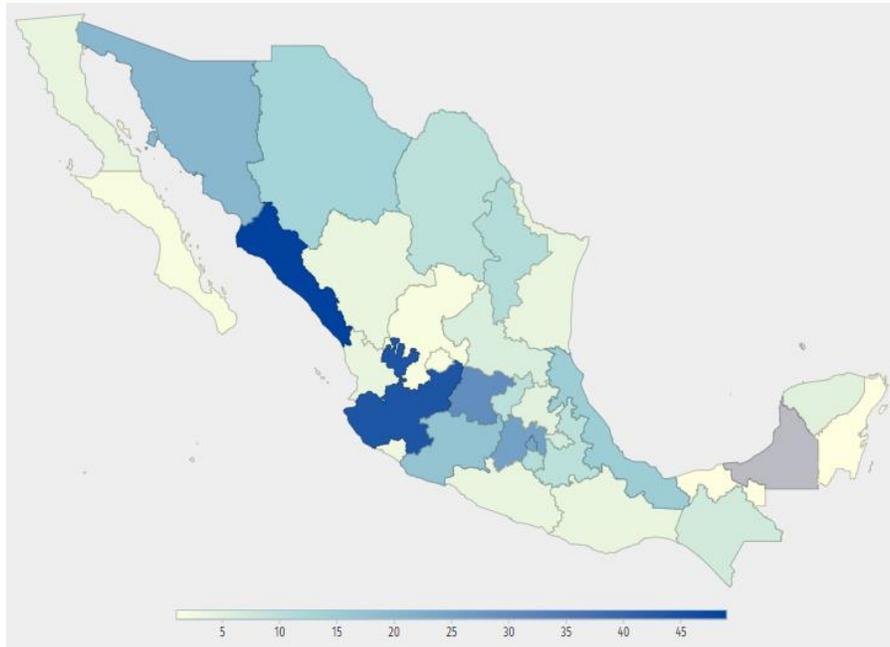


Figura 4.2. Distribución de unidades económicas relacionadas con la producción de fertilizantes y agroquímicos. Obtenido de DataMéxico (2019).

Los proveedores de fertilizantes orgánicos son el 40% del total de proveedores registrados en Mexico Red (s.f.). De acuerdo con López Arteaga (2017) el mercado de los fertilizantes se encuentra en un estado de transición entre los fertilizantes inorgánicos y orgánicos impulsado por la solución de problemas sociales y ambientales de México.

La oferta de fertilizantes en México se representa como la suma de la oferta nacional y la oferta internacional. En la figura 4.3 se presenta la oferta de fertilizantes en México, para su elaboración se utilizan los datos de las columnas “Producción nacional” e “Importación” de la tabla 4.3.



Figura 4.3. Oferta de fertilizantes en México desde 1995 hasta el 2018. Datos obtenidos de SEMARNAT (2014) y GCMA (2020).

#### 4.1.6 Comparación de la oferta y la demanda.

Utilizando los datos reportados en la tabla 4.3 se presenta en la figura 4.4 la comparación entre la oferta y la demanda de fertilizantes en México.

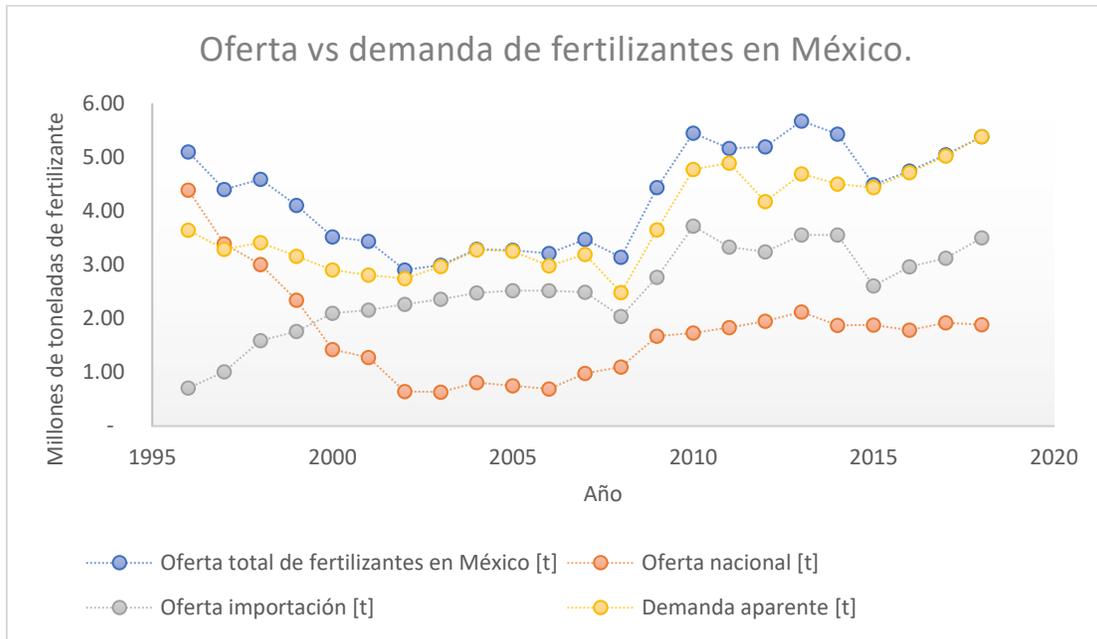


Figura 4.4. Oferta vs demanda de fertilizantes en México. Datos obtenidos de SEMARNAT (2014) y GCMA (2020).

La oferta nacional de fertilizantes siempre está por debajo de la demanda aparente, la demanda ha tenido una tendencia a aumentar a través de los años mientras que la oferta nacional tiene la tendencia a disminuir por lo que la diferencia entre ellas es más notable en los últimos años. Por otra parte, tomando en cuenta las importaciones, la oferta alcanza a cubrir la demanda lo que significa que México está siendo dependiente de otros países para poder satisfacer las necesidades de los clientes. Este hecho es relevante ya que justifica la necesidad de aumentar la producción nacional de fertilizantes tanto orgánicos como inorgánicos los cuales pueden ser clasificados como productos sustitutos de las importaciones.

#### 4.1.7 Proyección de oferta y demanda.

Un factor a tener en cuenta para proyectar la demanda es el crecimiento de la población (Núñez Jiménez, 1997), conocer el comportamiento de la población en un determinado periodo de tiempo puede relacionarse con el crecimiento esperado de la demanda. En la tabla 4.4 se presenta la densidad de la población de los estados en los que se pretende comercializar la composta y la densidad de la población de todo el país.

Tabla 4.4. Densidad de población en habitantes por  $\text{km}^2$ . Datos obtenidos de INEGI (2020).

Entidad federativa	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Estados Unidos Mexicanos	41	46.7	49.8	52.7	57.3	61	64.3

Chiapas	43	48.6	53.3	58.3	65.4	71.2	75.6
Oaxaca	32	34.7	36.9	37.6	40.6	42.3	44.1
Quintana Roo	10	17.9	22.3	29	29.6	33.6	41.6
Yucatán	35	36	38.1	41.7	49.5	53.1	58.7

Se observa que la densidad de la población desde el año de 1990 hasta 2020 en todos los casos siempre ha ido en aumento. El aumento en la población implica que la demanda de cultivos para alimentos también estará en aumento por lo que el uso de fertilizantes también debe mostrar una tendencia al alza.

Para proyectar la oferta y la demanda de fertilizantes en México se utiliza la información histórica de la oferta total y la demanda aparente con el objetivo de obtener la línea de tendencia para cada serie de datos, en la figura 4.5 se presenta el gráfico con las líneas de tendencia.

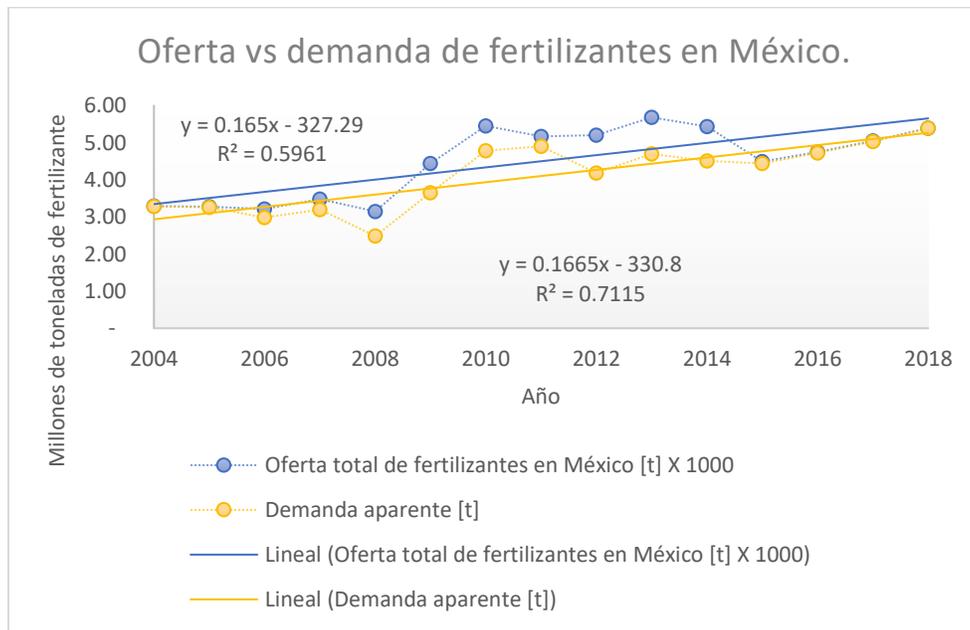


Figura 4.5. Líneas de tendencia para la oferta y demanda de fertilizantes en México. Elaboración propia.

Utilizando la ecuación de la línea de tendencia se proyecta la oferta y la demanda. En la tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la oferta y demanda proyectada.

Tabla 4.5. Oferta y demanda proyectada en millones de toneladas. Elaboración propia.

Año	Oferta proyectada [millones de t]	Demanda proyectada [millones de t]
2019	5.84	5.36
2020	6.01	5.53
2021	6.18	5.70
2022	6.34	5.86

2023	6.51	6.03
2024	6.67	6.20
2025	6.83	6.36
2026	7.00	6.53
2027	7.17	6.70
2028	7.33	6.86
2029	7.50	7.03
2030	7.66	7.19
2031	7.82	7.36
2032	7.99	7.53
2033	8.15	7.69
2034	8.32	7.86
2035	8.49	8.03
2036	8.65	8.19
2037	8.82	8.36
2038	8.98	8.53
2039	9.14	8.69
2040	9.31	8.86

La oferta proyectada siempre resulta ser mayor a la demanda proyectada debido a que en México la demanda de fertilizante no cubierta por la producción nacional se cubre utilizando las importaciones, el objetivo de producir el fertilizante orgánico es poder disminuir las importaciones al mismo tiempo que se obtienen los beneficios de reducir el uso de fertilizantes inorgánicos.

#### 4.1.8 Determinación del precio.

El precio es un factor importante que determina la comercialización del producto en la población, a continuación, se presentan los precios de algunos fertilizantes con la finalidad de poder comparar y ofrecer un precio razonable para la composta de acuerdo con los precios ofertados por los competidores. En la tabla 4.6 se presentan los precios de fertilizantes inorgánicos comercializados en la región donde se pretende vender la composta.

Tabla 4.6. Precio de fertilizantes inorgánicos en MXN. Obtenido de SNIIM (2021).

Estado	Producto	Precio [\$/kg]
Chiapas	Cloruro de potasio	10.5
Chiapas	Fosfato diamónico	14
Chiapas	Nitrato de amonio	12
Chiapas	Sulfato de amonio	9
Chiapas	Sulfato de potasio	17
Chiapas	Superfosfato simple	8
Chiapas	Superfosfato triple	14
Chiapas	Urea	8

Oaxaca	Cloruro de potasio	8.71
Oaxaca	Complejo npk triple 17	9.22
Oaxaca	Fosfato diamónico	10.22
Oaxaca	Nitrato de amonio	8.22
Oaxaca	Sulfato de amonio	5.2
Oaxaca	Superfosfato triple	9.78
Oaxaca	Urea	8.62
Yucatán	Complejo npk triple 17	10
Yucatán	Fosfato diamónico	13
Yucatán	Sulfato de amonio	5.4
Yucatán	Urea	8.8

Los fertilizantes inorgánicos presentados en la tabla 4.6 son los comercializados por toneladas en Chiapas, Oaxaca y Yucatán, en el caso de Quintana Roo no se encontró información de fertilizantes inorgánico comercializado por tonelada. El precio promedio del fertilizante inorgánico en esta región es de 9.98 \$/kg en MXN.

Los precios de los fertilizantes orgánicos están reportados en la mayoría de los casos para la venta al menudeo, sin embargo, Avila Villegas & Olvera Granados (2006) reportan datos del precio de venta al mayoreo por intermediarios para el año 2006. Para estimar el precio actual de los fertilizantes orgánicos utilizando la información de Avila Villegas & Olvera Granados (2006) se toma en consideración que la ganancia del productor al primer intermediario es del 40% (Hummel, s.f.), posteriormente el valor obtenido se actualiza utilizando la calculadora de inflación del INEGI (2021). En la tabla 4.7 se presentan los precios estimados de los fertilizantes orgánicos.

*Tabla 4.7. Precios estimados de fertilizantes orgánicos en MXN. Datos obtenidos de (Avila Villegas & Olvera Granados (2006) y Micorrizas supra (s.f.).*

Marca	Precio [\$/kg]
Biofer	12.64
Kelkat's	14.22
Ferti-organ	11.37
Micro-Fer	15.16
Foresta	13.90
Agromil-plus	13.27
Biocompost Supra*	7.90

\* Dato de composta reportado por (Micorrizas supra, s.f.).

El precio promedio de los fertilizantes orgánicos al mayoreo es de 12.64 \$/kg en MXN, para el caso de los precios ofertados al menudeo los precios pueden oscilar de los 20 \$/kg hasta más de 50 \$/kg en MXN.

El producto está dirigido a los agricultores por ventas al mayoreo, por lo tanto, el precio del compost debe ser menor al precio de los fertilizantes inorgánicos para que los agricultores cambien sus preferencias de consumo al fertilizante orgánico. El promedio del precio de fertilizantes orgánicos es superior al promedio del precio de los fertilizantes inorgánicos, ofrecer un precio bajo para el fertilizante orgánico en el mercado respecto a los fertilizantes orgánicos e inorgánicos incentivará la conciencia social al cuidado del medio ambiente y fomentará el desarrollo de la agricultura orgánica. El precio base de la composta comercializada en el proyecto es de 7.5 \$/kg en MXN, el detalle del cálculo para el precio del compost se presenta en la sección 4.11.2.1.

#### 4.1.9 Estrategia de comercialización.

La composta será vendida directamente en la planta y a través de sitios web, se preferirá la venta a proveedores mayoristas debido a que estos ofrecen una fuerza de ventas que puede detectar las necesidades actuales de los clientes y abarcar mayores áreas geográficas (Díaz Castillo, López Ruiz, & Munguía Martínez, 2018) disminuyendo los costos de transporte. La venta del producto en la planta será de al menos un bulto en la mínima presentación disponible de 30 kg a un precio de 7.5 \$/kg, a partir de la compra de 0.5 t y hasta 4.999 t se ofrecerá un descuento del 10% y para compras mayores o iguales a 5 t el descuento será de un 25 %. El producto podrá ser adquirido de contado o a crédito con un plazo de pago máximo de 3 meses.

Por ser un producto nuevo en el mercado se requiere una mayor inversión en publicidad y marketing, se propone una mayor inversión en este rubro durante los primeros 5 años de operación de la planta, después se comenzará a disminuir el presupuesto destinado a publicidad y marketing. Durante los primeros 5 años se destinará un presupuesto del 10% respecto a los ingresos de la planta, los siguientes 5 años el 5%, los próximos 5 años el 3% y los últimos 5 años el 2%. La publicidad incluirá visitas a los agricultores y proveedores mayoristas, propaganda en los principales puntos de venta, creación de página web, uso de redes sociales, etc. Se buscará crear conciencia en la población de las regiones a comercializar el fertilizante orgánico por medio de campañas publicitarias y convenios con instituciones agrícolas, hoteleras, pesqueras y escolares.

Se proporcionarán servicios complementarios a los consumidores sobre la correcta aplicación de la composta, las dosis recomendadas y los beneficios de utilizar fertilizantes orgánicos para complementar y/o reemplazar a los fertilizantes inorgánicos. Las capacitaciones serán presenciales, vía telefónica o por correo electrónico, además se incluirán las instrucciones básicas del producto impresas en el envase.

#### 4.1.10 Fuerzas de Porter.

El modelo de las 5 fuerzas de Porter sirve para analizar la competencia dentro de una industria y desarrollar una estrategia de negocios (Martín, 2018). Los objetivos de las fuerzas de Porter son: Identificar donde se encuentra situada la empresa respecto a la competencia, determinar el grado de competitividad que existe en el mercado, conocer que tan atractivo es el mercado y detectar oportunidades y amenazas (Villar, 2016) que permitan a la empresa establecer y planificar estrategias para potenciar las oportunidades y hacer frente a las amenazas (Galiana, 2020).

#### 4.1.10.1 Rivalidad entre competidores existentes.

De acuerdo con la figura 4.4 la oferta nacional de fertilizantes disminuyó a poco menos de la mitad en el mercado mexicano, en 1995 México tenía una producción de 4 millones de toneladas de fertilizantes, de 1995 al 2009 la producción disminuyó y a partir del 2009 se estabilizó en un valor cercano a los 1.9 millones de toneladas. Utilizando esta información se puede inferir que la rivalidad de los competidores es baja ya que la demanda de fertilizantes supera por mucho a la oferta nacional, esto quiere decir que tienen la posibilidad de comercializar todo su producto y solo complementar la demanda insatisfecha con las importaciones. Otro aspecto que nos indica una rivalidad baja entre los competidores es el precio de venta de los fertilizantes importados, en CDRSSA (2019) se menciona que las importaciones tienen un precio mucho menor que el precio de venta en México, el margen de comercialización es amplio debido a la falta de ofertantes lo cual implica que los grandes productores y distribuidores controlen el mercado con un nivel de amenaza bajo entre ellos.

#### 4.1.10.2 Amenaza de nuevos competidores.

Existen pobladores cercanos a las costas que desarrollan sus propios fertilizantes utilizando el sorgazo, pero las cantidades que son capaces de producir son mínimas y en general su producción se comercializa en pequeños negocios locales (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). La amenaza de nuevos competidores es moderada debido a la necesidad de capital para la inversión inicial, los altos costos de transporte de materia prima y la poca predictibilidad del sorgazo en las costas del Caribe mexicano.

#### 4.1.10.3 Amenaza de sustitutos.

En el mercado existe una gran diversidad de posibles productos sustitutos a la composta como pueden ser los fertilizantes orgánicos e inorgánicos, sin embargo, la amenaza de sustitutos es baja ya que no hay una industrialización a gran escala de fertilizantes base alga y las pocas industrias que lo comercializan se ubican en los estados del norte, esto significa que la composta producida es un producto diferenciado de los otros fertilizantes orgánicos especialmente en la región sur del país.

#### 4.1.10.4 Poder de compradores.

En el mercado general de fertilizantes el poder de los compradores es bajo debido a la alta demanda de fertilizantes inorgánicos y baja oferta nacional, pero en el mercado específico de la agricultura orgánica por ser un enfoque relativamente nuevo que aún está en crecimiento en México (Infoagro, 2017) la fuerza de los compradores podría considerarse como moderada ya que su demanda es menor y la exigencia de calidad mayor, por lo que ganan poder para negociar el precio del fertilizante. El poder de los compradores no se considera como alto debido a la baja cantidad de proveedores de fertilizante orgánico que hay en el sur del país de acuerdo a lo presentado en la sección 4.1.5 lo cual establece un mejor equilibrio entre los ofertantes y los demandantes desarrollando mejores ambientes de negociación entre ambas partes.

#### 4.1.10.5 Poder de proveedores.

El sorgo es una materia prima que se obtiene naturalmente de los arribazones de sorgo, por otra parte, los residuos de madera, purines porcinos y residuos agrícolas requeridos por el proceso podrían aumentar el poder de los proveedores. Si la demanda de los residuos de madera va en aumento la industria maderera se podría plantear un aumento en el precio de sus desechos. Para el caso de la industria agrícola y purines porcinos los residuos se consideran como una materia prima sin costo, pero si la demanda de esta materia prima crece, los agricultores y dueños de granjas porcinas podrían adoptar una postura de comercialización con sus residuos. Actualmente debido al grado de desarrollo de la agricultura orgánica en México el poder de los proveedores es moderado, pero se debe considerar que en un futuro y dependiendo de las condiciones del mercado su poder puede llegar a ser alto.

#### 4.2 Análisis FODA.

El análisis FODA es una herramienta para crear una estrategia empresarial y conseguir los objetivos que se tienen en mente, sirve para evaluar las consecuencias positivas o negativas al tomar una decisión (OCC, 2021). La tabla 4.8 presenta el análisis FODA del proyecto estudiado.

Tabla 4.8. Análisis FODA. Elaboración propia.

FORTALEZAS	DEBILIDADES
1. Uso de tecnologías amigables con el ambiente. 2. Recolección y uso del sorgo antes de que afecte a las playas. 3. Beneficios al sector turístico y pesquero. 4. Uso de tecnologías maduras. 5. Recolección y tratamiento de residuos que afectan negativamente a las comunidades. 6. Disponibilidad de purines porcinos en todo el año. 7. Producción de fertilizante orgánico. 8. Beneficios a la tierra por uso de fertilizantes orgánicos. 9. Precio de fertilizante orgánico menor al fertilizante inorgánico. 10. Autoabastecimiento eléctrico y térmico. 11. Generación distribuida. 12. Obtención de CEL.	1. Bajo desarrollo del mercado para fertilizantes orgánicos. 2. Inversión alta. 3. Menor eficiencia de fertilizantes orgánicos a corto plazo comparado con los fertilizantes inorgánicos. 4. Altos costos de transporte. 5. Lista de clientes inexistente. 6. Acaparamiento del mercado por los fertilizantes inorgánicos. 7. Resistencia al cambio por parte de los agricultores. 8. Bajos rendimientos de biogás 9. Desconocimiento y/o miedo de la población sobre las plantas de biogás.
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Disponibilidad de otros residuos orgánicos propios de la región que no fueron considerados en este trabajo. 2. Generar alianzas con el sector turístico y con las granjas porcinas. 3. Convenios con el sector educativo.	

<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Aumento de granjas porcinas en Yucatán.</li> <li>5. Trabajar en conjunto con los proveedores de fertilizantes inorgánicos, mostrarnos como productos complementarios al suyo.</li> <li>6. Generar conciencia y entendimiento en la población para el apoyo de futuras plantas de biogás y composta.</li> <li>7. Posibilidad de generar ingresos por el transporte de los desechos.</li> <li>8. Desarrollar el mercado y posicionarse como líderes del mismo.</li> <li>9. Informar y fomentar el uso de tecnologías limpias.</li> <li>10. Abrir el camino para el aprovechamiento de una mayor diversidad de desechos orgánicos por medio de las biorrefinerías.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Productores de fertilizantes inorgánicos pueden categorizarnos como competencia.</li> <li>2. Periodicidad del sargazo.</li> <li>3. Entrada de nuevas empresas de composta y biogás.</li> <li>4. Disgusto por parte de la población por el constante paso de camiones, malos olores, ruido, etc.</li> <li>5. Volatilidad de precio de la gasolina y diésel.</li> <li>6. Situaciones políticas que no permitan el desarrollo de tecnologías limpias.</li> </ol>
--	---

### 4.3 Localización de la planta.

Para evaluar la localización de la planta se proponen 2 posibles áreas geográficas en función de las materias primas a utilizar en el proceso. Las opciones son la zona costera de Cancún en Quintana Roo y la zona de Dzityá Yucatán.

#### 4.3.1 Disponibilidad y localización de materias primas.

##### 4.3.1.1 Sargazo.

El proceso para la producción de composta y biogás desarrollado en este trabajo requiere de una cantidad de sargazo de 240 t al día lo que es igual a 7,200 t de sargazo al mes. La cantidad de sargazo reportada para las costas de Quintana Roo de acuerdo con Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) en condiciones normales puede variar de 1 a 10 kg de sargazo por metro de playa, sin embargo, se menciona que en los arribazones de sargazo esta cantidad puede aumentar a más de 300 kg de sargazo por metro de playa. En la figura 4.6 se presenta las áreas afectadas en el Caribe mexicano por los arribazones de sargazo.

En Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) se estima un flujo másico de sargazo en las costas de Cancún de 1,920 t de sargazo por día, esto representa 59,520 t de sargazo por mes. El cálculo del flujo de sargazo por Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem (2016) toma en cuenta las siguientes consideraciones: Longitud de costa en Cancún de 12 km, cantidad de sargazo de 200 kg de sargazo por metro de playa y un factor de contaminación por arena del 20% (Bastiaan, Willemijn, Lukas, & Willem, 2016). Por otra parte, Méndez (2021) y Yangali (2019) reportan cantidades recolectadas de sargazo de más de 10,000 t de sargazo al mes. De acuerdo con los datos encontrados en la literatura se dispone de suficiente materia prima para suplir la demanda del proceso en temporadas de gran afluencia de sargazo, para las temporadas de poca afluencia de sargazo la falta de materia prima puede ser compensada utilizando un cosustrato en la digestión anaerobia como pueden ser los purines porcinos.



Figura 4.6. Zona costera de Quintana Roo afectada por los arribazones de sargazo. Obtenida de Varillas (2019).

La tabla 4.9 presenta las distancias entre los lugares propuestos para la ubicación de la planta y las zonas de recolección de sargazo.

Tabla 4.9. Distancia de posibles localizaciones de la planta a los lugares de recolección de sargazo. Obtenido de Google (2021).

Lugares de recolección de sargazo	Distancia a Dzityá, Yucatán [km]	Distancia a Cancún Quintana Roo [km]
Costas Cancún	327	5.1
Costas puerto Morelos	344	38.4

El sargazo solo puede ser recolectado en las zonas costeras por lo que las costas del estado de Quintana Roo tienen ventaja respecto a Dzityá Yucatán.

#### 4.3.1.2 Purines porcinos.

Los purines porcinos son una materia prima disponible todo el año en el estado de Yucatán y parte de Quintana Roo (Miranda, 2020), también son un desecho que contamina los mantos acuíferos de la región provocando deforestaciones y pérdidas de biodiversidad (Albarran, 2020). En la figura 4.7 se presenta la localización de las granjas porcinas en la península de Yucatán.

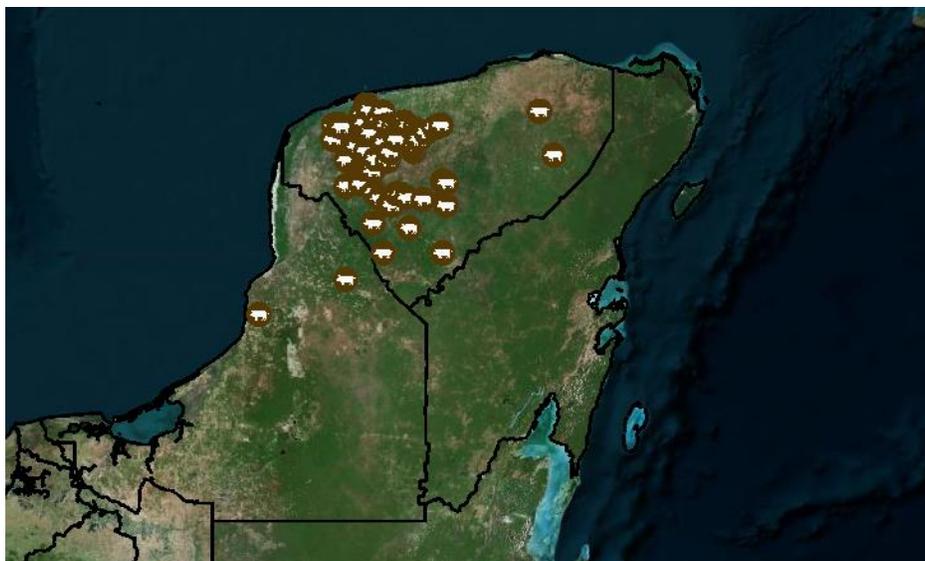


Figura 4.7. Localización de principales granjas porcinas. Obtenido de SENER (2018).

El requerimiento de purines porcinos para el proceso es de 720 t de purín porcino al día, Méndez Novelo (2009) se encontró que las granjas porcinas del estado de Yucatán producen 9,428 toneladas de purines porcinos al día, esta cantidad excede por mucho las necesidades de la planta y puede complementar la falta de sargazo en las temporadas de baja afluencia de sargazo. La tabla 4.10 muestra las distancias entre los municipios con granjas porcinas del estado de Yucatán y los posibles lugares de localización de la planta.

Tabla 4.10. Distancia de posibles localizaciones de la planta a los municipios con granjas porcinas. Distancias obtenidas de Google (2021).

Municipios de granjas porcinas	Distancia de Dzityá, Yucatán [km]	Distancia a Cancún Quintana Roo [km]
Abalá	57.6	351.0
Acanceh	47.3	295.0
Cacalchén	59.8	286.0
Cantamayec	130.0	268.0
Chicxulub pueblo	31.1	342.0
Chocholá	46.0	339.0
Chumayel	98.2	359.0
Conkal	22.9	315.0
Dzán	102.0	380.0
Hocabá	65.2	274.0
Hoctún	64.7	259.0
Hopelchén	27.7	386.0
Hunucmá	28.7	347.0
Izamal	85.7	254.0
Kanasín	24.2	300.0
Kinchil	41.0	355.0

Mama	91.8	353.0
Mayapán	22.7	306.0
Mérida	24.0	303.0
Muna	72.2	365.0
Opichén	84.6	377.0
Progreso	30.4	341.0
Sacalum	114.0	355.0
Santa Elena	103.0	389.0
Sotuta	117.0	252.0
Tahmek	58.2	267.0
Tecoh	54.5	314.0
Tekantó	88.1	277.0
Tekax	136.0	315.0
Tepakán	76.7	267.0
Ticul	94.5	375.0
Tixkokob	40.8	288.0
Tixpéhual	34.9	296.0
Umán	27.0	325.0
<b>Promedio</b>	<b>64.8</b>	<b>319.9</b>

Las granjas porcinas y en específico las mega granjas porcinas se encuentran ubicadas en zonas cercanas a Mérida Yucatán (Méndez Novelo, y otros, 2009) por lo que la ubicación de Dzityá, Yucatán se ve favorecida.

#### 4.3.1.3 Desechos de madera.

La cantidad de desechos de madera requeridos por el proceso es de 40.6 t al día. Uno de los estados cercanos a Yucatán y con una gran producción de madera es el estado de Oaxaca. El estado de Oaxaca se encuentra en 3° lugar en producción de madera a nivel nacional y produce 624,937 m<sup>3</sup> de madera al año (Comisión Nacional Forestal, 2019). La densidad de la madera en México se encuentra en el rango de 460 kg/m<sup>3</sup> a 820 kg/m<sup>3</sup> (Ordóñez Díaz, y otros, 2015), tomando el valor mínimo de densidad para realizar el cálculo obtenemos una producción maderera de 287,471 t de madera al año lo que es igual a 787 t de madera por día. Fregoso Madueño (2017) presenta datos de la cantidad de materia desperdiciada por la industria maderera, se menciona que del total de madera producida un 35% se dispone como desecho, considerando este hecho se obtiene que la cantidad de desechos madereros disponibles en Oaxaca es de 276 t de madera por día cantidad suficiente para satisfacer la demanda del proceso. Considerando Oaxaca se encuentra más cerca de Yucatán que de Quintana Roo la localización de la planta se ve beneficiada en Dzityá, Yucatán.

#### 4.3.1.4 Desechos para proceso de composta.

El proceso de composta demanda una cantidad de 199 t de desechos por día y se constituye de una mezcla de distintos residuos como son las hojas, fibra de coco, bagazo de henequén y residuos de

frutas. De acuerdo con Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña (2018) las hojas de dzidzilche, la fibra de coco y el bagazo de henequén son residuos recomendados para utilizar como sustratos agrícolas. Por otra parte, el estado de Yucatán y Quintana Roo cuentan con residuos agrícolas como son la calabacita, chile verde, frijol, maíz, melón, pepino, sandía, tomate rojo entre otros (SENER, 2018) los cuales tiene el potencial para ser utilizados en el proceso de composta. La localización geográfica de los residuos puede ser consultada en SENER (2018). Se propone una mezcla con estos residuos ya que se encuentran disponibles durante todo el año de acuerdo con Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña (2018). En la tabla 4.11 se presenta la producción anual en el 2019 para algunos cultivos en el estado de Quintana Roo y Yucatán.

*Tabla 4.11. Producción anual en 2019 para algunos cultivos en Quintana Roo y Yucatán. Obtenidos de SIAP (2019).*

<b>Producto</b>	<b>Producción Quintana Roo [t/año]</b>	<b>Producción Yucatán [t/año]</b>
Aguacate	-	10,773
Calabacita	1,432	13,664
Chile verde	4,511	2,195
Coco	-	7,907
Elote	22,227	-
Frijol	2,520	131
Henequén	-	-
Maíz	19,976	65,851
Melón	-	148
Naranja	15,231	167,283
Papaya	12,521	15,170
Pepino	8,038	35,716
Piña	33,658	160
Plátano	8,727	2,865
Sandía	12,439	3,373
Sorgo grano	14,673	286
Soya	2,986	13,227
Tomate rojo	2,118	1,280
Toronja	-	10,236
<b>Total</b>	<b>161,057</b>	<b>350,265</b>

#### 4.3.2 Disponibilidad mano de obra.

Para evaluar la disponibilidad de la mano de obra se tabula la tasa de desempleo para los estados de Quintana Roo y Yucatán, los datos se presentan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Tasa de desempleo para los estados de Quintana Roo y Yucatán respecto a la población económicamente activa. Obtenido de INEGI (2020).

Estado	2017	2018	2019	2020
Quintana Roo	3.11 %	2.72 %	3.05 %	2.92 %
Yucatán	2.03 %	1.77 %	1.88 %	1.98 %

De acuerdo con la tabla 4.12 existe una mayor disponibilidad de mano de obra en el estado de Quintana Roo.

#### 4.3.3 Costo de vida.

El costo de vida es el monto de dinero necesario para cubrir los gastos básicos como el alojamiento, comida, vestido, salud, etc (Gutiérrez, 2021). La evaluación del costo de vida se lleva a cabo utilizando el índice nacional de precios al consumidor reportado en INEGI (2021). En el 2020 la inflación en Yucatán se reporta de 4.19 % mientras que para Quintana Roo fue de 2.45 %. Union Yucatán (2019) menciona que Yucatán se encuentra en el 6° lugar de los estados con un mayor incremento en sus precios. Tomando en consideración estos datos Quintana Roo presenta ventajas en el costo de vida respecto a Yucatán.

#### 4.3.4 Costo de servicios industriales.

Los servicios requeridos por la planta son el gas natural utilizado en la turbina de gas para complementar el combustible y el agua para los servicios de enfriamiento. En la tabla 4.13 se presenta el precio del gas natural para Yucatán y Quintana Roo mientras que en las tablas 4.14 y 4.15 se muestra el precio del agua para uso industrial en Yucatán y Quintana Roo respectivamente.

Tabla 4.13. Precio de gas natural en MXN/GJ. Obtenido de CRE (2020).

Estado	2018	2019	2020
Yucatán	114.99	61.3	60.36
Quintana Roo	114.99	61.3	60.36

Tabla 4.14. Precio del agua en MXN para uso industrial en el estado de Yucatán. Obtenido de JAPAY (2018).

Límites		Cuotas	
Inferior	Superior	Cuota base	Cuota por m <sup>3</sup>
0	30	188.65	0
31	60	0	7.98
61	100	0	8.53
101	150	0	9.08
151	200	0	9.85

201	250	0	10.45
251	300	0	10.78
301	400	0	11.33
401	750	0	12.1
751	1,500	0	12.43
1,501	2,250	0	13.09
2,251	999,999	0	13.26

Tabla 4.15. Precio del agua para uso industrial en el estado de Quintana Roo en MXN. Obtenido de Poder legislativo del estado libre y soberano de Quintana Roo (2019).

Límites		Cuotas	
Inferior	Superior	Cuota base	Cuota por m <sup>3</sup>
0	10	26.48	0
11	50	73.21	6.49
51	100	332.63	13.39
101	200	1,216.59	21.66
201	500	3,383.3	28.29
501	1,000	11,848.13	65.13
1001	999,999	43,737.1	68.44

El precio del gas natural es el mismo para ambos estados por lo que no hay ninguna diferencia en este aspecto, sin embargo, para el caso del agua se observa a partir de los datos reportados en las tablas 4.14 y 4.15 que el precio del agua en Yucatán es más bajo que el de Quintana Roo para un flujo volumétrico de 1,601 m<sup>3</sup> de agua al bimestre el cual es el consumo de agua de la planta.

#### 4.3.5 Cercanía de consumidores.

Los principales consumidores de composta son los agricultores, en Agricultura moderna (2018) se presenta una lista de los estados con mayor producción agrícola en México, dentro de los estados mencionados destacan para este proyecto debido a su cercanía con las zonas propuestas para la planta los estados de Chiapas y Oaxaca. Además de considerar a los estados de Chiapas y Oaxaca como posibles estados con demanda de composta también se consideran como sitios de venta del producto a los estados de Yucatán y Quintana Roo. En la tabla 4.16 se presenta la distancia que hay entre las ubicaciones propuestas de la planta y las capitales de los 4 estados.

Tabla 4.16. Distancia de la ubicación de la planta a las capitales de los estados consumidores del producto en km. Elaboración propia con datos de Google (2021).

Ubicación de planta	Mérida, Yucatán	Chetumal, Quintana Roo	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	Oaxaca, Oaxaca	Promedio
Dzityá, Yucatán	24	402	812	1,336	643
Cancún, Quintana Roo	303	384	1,106	1,630	856

La distancia promedio entre de Dzityá, Yucatán a las capitales de los 4 estados consumidores del producto es menor que la de Cancún, Quintana Roo, por lo que se prefiere a Yucatán como ubicación de la planta.

#### 4.3.6 Costo de terreno.

Para evaluar el costo del terreno se compara el costo promedio en pesos mexicanos por metro cuadrado de terreno para los dos estados donde se propone ubicar la planta. La tabla 4.17 resume los datos encontrados y el costo promedio del terreno para los estados Quintana Roo y Yucatán.

Tabla 4.17. Costo del terreno en Yucatán y Quintana Roo en MXN/m<sup>2</sup>. Obtenido de Propiedades (2021), Yucatán premier bienes raíces (2013), Vivanuncios (2021) e Inmuebles24 (2020).

Concepto	Costo terreno Yucatán	Costo terreno Quintana Roo
Costo terreno	\$ 174.69	\$ 8,300.00
Costo terreno	\$ 1,388.89	\$ 1,000.00
Costo terreno	\$ 841.38	\$ 6,500.00
Costo terreno	\$ 1,458.33	\$ 552.00
Costo terreno	\$ 1,967.11	\$ 450.00
Costo terreno	\$ 1,249.23	\$ 8,000.00
Costo terreno	\$ 631.07	\$ 3,571.67
Costo terreno	\$ 2,002.25	\$ 1,200.00
Costo terreno	\$ 1,200.00	\$ 6,000.00
<b>Costo promedio terreno</b>	<b>\$ 1,212.55</b>	<b>\$ 3,952.63</b>

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 4.17 resulta más viable la compra del terreno en el estado de Yucatán debido a su menor costo por metro cuadrado.

#### 4.3.7 Impacto social y ambiental.

Para tener idea del impacto social que puede generar una nueva planta industrial se toma como referencia las unidades económicas del estado de Yucatán y Quintana Roo bajo la premisa de que en una región altamente industrializada serán menos notorios los cambios y beneficios sociales

debidos al ingreso de una nueva planta respecto a una zona menos industrializada (Anaya Durand, Barragán Acevedo, & Vergara Vega, 2015). En la tabla 4.18 se tabulan las unidades económicas de ambos estados.

*Tabla 4.18. Unidades económicas entre 1998 y 2019 para los estados de Yucatán y Quintana Roo. Obtenidos de INEGI (2021).*

Año	Total de unidades económicas Yucatán	Total de unidades económicas Quintana Roo
1998	79,346	35,858
2003	88,707	41,490
2008	113,848	54,181
2019	142,976	70,224

El estado de Quintana Roo posee una menor cantidad de unidades económicas que Yucatán, lo cual implica un mayor beneficio social para Quintana Roo en caso de ser seleccionado como la localización de la planta.

Las plantas de producción de biofertilizantes y biogás son una industria limpia que para el caso estudiado en este trabajo genera impactos positivos al medio ambiente como son:

1. Recolección y tratamiento de sargazo, purines porcinos y residuos agrícolas.
2. Eliminación de malos olores en las costas debido al sargazo.
3. Mayor oxigenación del agua en las costas.
4. Disminución de la contaminación de mantos acuíferos debido a la mala disposición de los purines porcinos.
5. Generación de energía limpia.
6. Uso de biofertilizantes para regenerar la tierra.

Uno de los impactos negativos en el medio ambiente para la planta propuesta es el transporte de las materias primas del lugar de recolección a la planta. Para realizar el transporte se necesitan camiones los cuales requieren combustibles fósiles para su funcionamiento. Tomando en consideración este aspecto una mayor distancia recorrida para transportar las materias primas implica un mayor uso de combustibles fósiles y por lo tanto una mayor emisión de gases dañinos al medio ambiente. En la tabla 4.19 se presentan los resultados de las distancias que deben recorrerse para transportar el sargazo y los purines porcinos a las dos posibles localizaciones de la planta.

*Tabla 4.19. Distancia recorrida para el transporte de las materias primas del lugar de recolección a la planta. Elaboración propia.*

Concepto	Dzityá, Yucatán	Cancún, Quintana Roo
Recorrido promedio para transporte de purines porcinos [km/día]	65	320

Recorrido promedio para transporte de sargazo [km/día]	327	5
Purín de cerdo requerido [m <sup>3</sup> /día]	720	720
Capacidad de pipas [m <sup>3</sup> ]	20	20
Pipas requeridas	36	36
Distancia recorrida por pipas	2,332	11,515
Sargazo requerido [t/día]	240	240
Capacidad camiones [t]	25	25
Camiones requeridos	10	10
Distancia recorrida por camiones	3,270	51
<b>Distancia total recorrida</b>	<b>5,602</b>	<b>11,566</b>

De acuerdo con los resultados obtenidos la distancia para transportar el sargazo y los purines porcinos a Cancún, Quintana Roo es mayor que la distancia a Dzityá, Yucatán, esto implica que el transporte de las materias primas a Cancún generará una mayor cantidad de gases de efecto invernadero debido a la combustión de combustibles fósiles, por lo tanto, resulta una mejor opción ambiental el transporte de materias primas a Dzityá, Yucatán.

#### 4.3.8 Matriz para la localización de la planta.

La selección de la localización de la planta se evalúa asignando una calificación y peso a cada uno de los elementos discutidos en las secciones anteriores y de acuerdo con el criterio del estudiante. En la tabla 4.20 se presentan los resultados. Las calificaciones asignadas a cada elemento son; (1) Desfavorable; (2) Neutro; (3) Favorable; (4) Muy favorable.

Tabla 4.20. Evaluación de la localización de la planta. Elaboración propia.

Factor	%	Dzityá, Yucatán	Cancún Quintana Roo	Ponderado Yucatán	Ponderado Quintana Roo
Disponibilidad de materias primas	25%	4	3	1	0.75
Cercanía de materias primas	35%	3	1	1.05	0.35
Disponibilidad de mano de obra	5%	3	4	0.15	0.2
Costo de vida	5%	3	4	0.15	0.2
Costo de servicios industriales	5%	4	3	0.2	0.15
Cercanía a mercados consumidores	10%	3	1	0.3	0.1
Costo de terreno	10%	4	3	0.4	0.3
Impacto social y ambiental	5%	3	2	0.15	0.1
Total	100%	27	20	3.4	2.15

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación se concluye que la mejor opción para la localización de la planta es Dzityá, Yucatán obteniendo un puntaje de 3.4 contra el puntaje de Cancún, Quintana Roo de 2.15. En la figura 4.8 se muestra la localización geográfica del lugar.

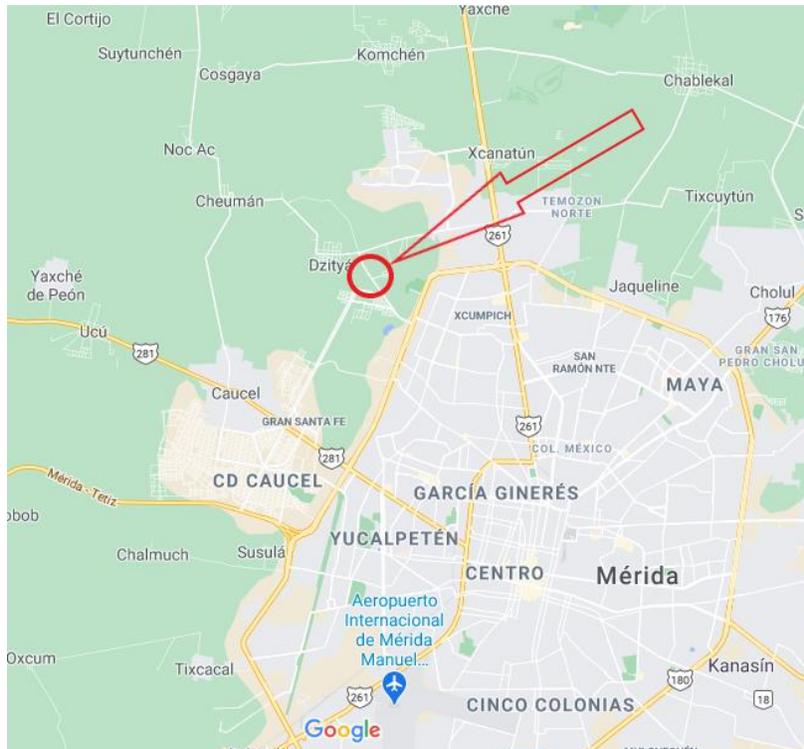


Figura 4.8. Localización geográfica de la planta. Obtenido de Google (2021).

#### 4.4 Capacidad de la planta.

La capacidad de la planta se estima considerando un factor de planta de 0.85 (Barragán Escandón, Olmedo Ruiz, Currillo Tigre, & Zalamea León, 2020) por lo que se tiene una capacidad de producción de composta de 75,324 t/año y una producción de biogás de 4,289 t/año, esta cantidad de biogás es equivalente a 618.23 Nm<sup>3</sup>/h o 0.52 MMSCFD y corresponde al biogás obtenido directamente del biodigestor V-201 antes de procesarlo. En la tabla 4.21 se presenta los principales flujos másicos de entrada y salida anuales de la planta.

Tabla 4.21. Principales flujos másicos de la planta. Elaboración propia.

Áreas: Pretratamiento de sorgazo y producción de biogás.	
Entradas	Flujos másicos [t/año]
Sorgazo	74,519.6
Purines porcinos	223,290.6
Residuos de madera	12,598.6
Agua	74,519.6
HCl	0.5

Hongo	7,505.6
<b>Total</b>	<b>392,434.5</b>
<b>Salidas</b>	<b>Flujos máxicos [t/año]</b>
Biogás	4,288.9
Lodos	388,145.1
<b>Total</b>	<b>392,434.5</b>
Área: Tratamiento de digestato.	
<b>Entradas</b>	<b>Flujos máxicos [t/año]</b>
Residuos agrícolas	61,652.9
Lodos	388,145.1
<b>Total</b>	<b>449,798.0</b>
<b>Salidas</b>	<b>Flujos máxicos [t/año]</b>
Composta	75,323.7
Agua clarificada	207,475.3
Purga	84,169.6
Compuestos degradados	82,829.3
<b>Total</b>	<b>449,798.0</b>
Área: Cogeneración.	
<b>Entradas</b>	<b>Flujos máxicos [t/año]</b>
Biogás	4,020.8
Gas natural	1,206.3
Aire	168,875.3
<b>Total</b>	<b>174,102.4</b>
<b>Salidas</b>	<b>Flujos máxicos [t/año]</b>
<b>Gases exhaustos</b>	<b>174,102.4</b>

Además de generar 75,323.7 t de composta/año, también se obtiene una potencia eléctrica de 1.47 MW lo cual genera 10,947 MWh/año de energía eléctrica, cantidad suficiente para suplir las necesidades de la planta y tener excedentes para venta.

#### 4.5 Descripción del proceso.

##### 4.5.1 Recolección de sargazo.

La recolección de sargazo se realiza por medio de barcos especializados los cuales aspiran las algas del océano, se utilizan 3 barcos sargaceros construidos y diseñados por la secretaría de marina (SEMAR) con capacidad de recolección por barco de 80 toneladas de sargazo al día (Notimex, 2019). El barco tiene una eslora de 15 m por 5.4 m de manga, con capacidad de carga de 20 toneladas, una

velocidad de maniobra de 3 nudos y una máxima de 6 nudos, también cuenta con una grúa de 5 toneladas, 3 bandas transportadoras de sargazo y sistema de lavado de alga, está diseñado para ser operado por 4 personas (Borbolla, 2019). Las características del barco se presentan en la figura 4.9.

El funcionamiento del barco de acuerdo a lo descrito por el contraalmirante Jorge Daniel Zamora Vuelas (2019) es "En la parte delantera la embarcación llevará una rampa mediante la cual el sargazo será obligado a subir casi a la altura de la cubierta del barco, donde existirá una banda transportadora que continuamente estará jalando el sargazo y concentrándolo en la parte más alta de una tolva para que a partir de allí sea escurrido y encostalado". El sargazo recolectado, prelavado y encostalado por el barco será transportado de la costa a la planta utilizando camiones con capacidad de 25 toneladas. La recolección del sargazo se realiza en las proximidades de las barreras de contención, lugar donde se acumulará el sargazo. Los barcos realizaran 4 recorridos por día con una duración de 2 horas cada recorrido para recolectar un total de 240 toneladas al día (Costa Veracruz, 2019).

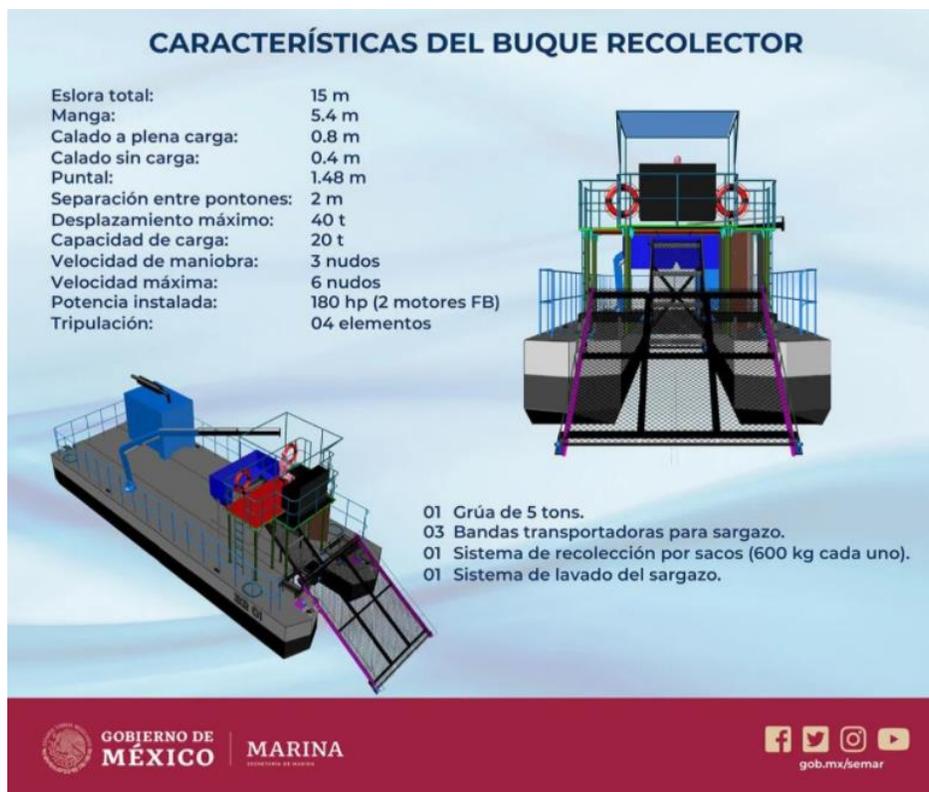


Figura 4.9. Características barco recolector de sargazo, desarrollado por la SEMAR. Obtenido de Costa Veracruz (2019).

El proceso requiere purín porcino recolectado de las granjas porcinas utilizando pipas con capacidad de 20 m<sup>3</sup> equipadas con bombas al vacío. La planta de tratamiento estará localizada cerca de las macro granjas porcinas, es necesario diseñar la ruta que recorrerán las pipas para maximizar la recolección y minimizar el recorrido.

#### 4.5.2 Pretratamiento de sargazo.

La primera área de la planta es llamada “Pretratamiento de sargazo” en la figura 4.10 se presenta el esquema de flujo de proceso correspondiente.

El sargazo recolectado con un flujo másico de 2.78 kg/s debe ser lavado con agua para eliminar arena y sales (Tapia-Tussell, y otros, 2018) elementos que pueden presentar efectos inhibidores en el proceso de digestión anaeróbica. El sargazo se alimenta al tanque de lavado V-101 mediante la cinta transportadora M-102 cuya potencia es de 1 kW. Para lavar el sargazo se hace pasar una corriente de agua fresca a través del sargazo en proporción 1:1 con un tiempo de residencia de 30 segundos a temperatura ambiente (Milledge J. J., Nielsen, Sadek, & Harvey, 2018), el tanque de lavado V-101 cuenta con una malla la cual permite que el agua fluya con los contaminantes mientras el sargazo continua a la siguiente etapa del proceso. El tanque de lavado V-101 tiene un volumen de 1.08 m<sup>3</sup> y está construido de acero inoxidable SS316.

El sargazo lavado es trasladado al molino de martillos M-101 cuya potencia es de 55 kW utilizando la cinta transportadora M-103 con una potencia de 1 KW. Marin (2009) utilizó un molino de martillos para disminuir el tamaño del sargazo de sus dimensiones típicas al momento de su recolección las cuales oscilan entre 0.6 m a 1.2 m a un tamaño de partícula de 0.001 m. El propósito del molino es homogenizar el tamaño del sargazo y aumentar su área de superficie para mejorar la eficiencia del pretratamiento. Aumentar el área de superficie acelera la tasa de biodegradación, sin embargo, la molienda de la biomasa no necesariamente incrementa el rendimiento de biogás obtenido (Nachwachsende, 2010).

El sargazo es sometido a un pretratamiento biológico con el objetivo de aumentar el rendimiento de producción de metano en un 20% utilizando el hongo *Trametes hirsuta*. En el tanque de pretratamiento V-102 el sargazo es alimentado por medio del tornillo sin fin M-104 el cual tiene una potencia de 2.22 kW y es mezclado con agua en una relación 1:1, ácido clorhídrico suficiente para obtener un valor de pH igual a 5 y el hongo *Trametes hirsuta*. Dentro del tanque de pretratamiento V-102 se obtiene una mezcla pastosa la cual es mezclada y calentada a 35°C con un tiempo de retención de 6 días (Tapia-Tussell, y otros, 2018), la corriente de salida del tanque V-102 es llamada mezcla de biomasa 1 y tiene un flujo másico de 5.83 kg/s. Para mantener el tanque de pretratamiento a la temperatura indicada son necesarios 195 kW térmicos los cuales serán suministrados utilizando el vapor obtenido en la descarga de la turbina de vapor K-502 de la sección de cogeneración. El flujo de vapor utilizado es de 0.08 kg/s a 145 °C y 115 kPa, esta corriente cede el calor al tanque V-102 y sale como líquido saturado a 103 °C y 110 kPa. El tanque V-102 tiene un volumen de 3,780 m<sup>3</sup> y está construido de acero al carbón con recubrimiento de acero inoxidable SS316.

La mezcla de biomasa 1 obtenida en el tanque de pretratamiento V-102 con un flujo másico de 5.83 kg/s a 35 °C es llevada al tanque de homogenización V-103 mediante el tornillo sin fin M-105 el cual requiere una potencia de 5.5 kW. En el tanque V-103 la mezcla de biomasa 1 se mezcla con 8.33 kg/s de purín porcino y 0.47 kg/s de desechos de madera durante 12 horas, el propósito del tanque de homogenización es formar una mezcla homogénea con los sustratos y obtener las condiciones óptimas que mejoran el proceso de la digestión anaeróbica (Cappelli, y otros, 2015). El sargazo muestra relaciones C:N bajas con valores cercanos a 7 (Milledge & Harvey, 2016), los purines de cerdo por otra parte tienen una relación C:N variable, para realizar los cálculos se toma el valor promedio de 4.3 reportado por Varnero, Muñoz, & Zúñiga (2009). La relación óptima de C:N reportada en la literatura es de 20 a 30 para el proceso de digestión anaeróbica, los desechos de

aserrín agregados al tanque V-103 poseen una relación C:N de 500 (Masabni & Lillard, 2010) y se agregan con el objetivo de aumentar la relación C:N a 25. La codigestión con purín porcino aumenta la cantidad de biogás y fertilizante obtenido cuya mezcla óptima es de 25% sargazo y 75% purín porcino de acuerdo con Murphy J. (2015). La mezcla de biomasa 1 se encuentra a una temperatura de 35°C, el purín de cerdo y el aserrín se consideran a temperatura ambiente por lo que se encuentran a 26 °C, la corriente obtenida del tanque de homogenización V-103 es llamada Mezcla de biomasa 2 y sale a 29 °C con un flujo másico de 14.64 kg/s. El tanque de homogenización V-103 tiene un volumen de diseño de 633 m<sup>3</sup> y está construido de acero inoxidable SS316.

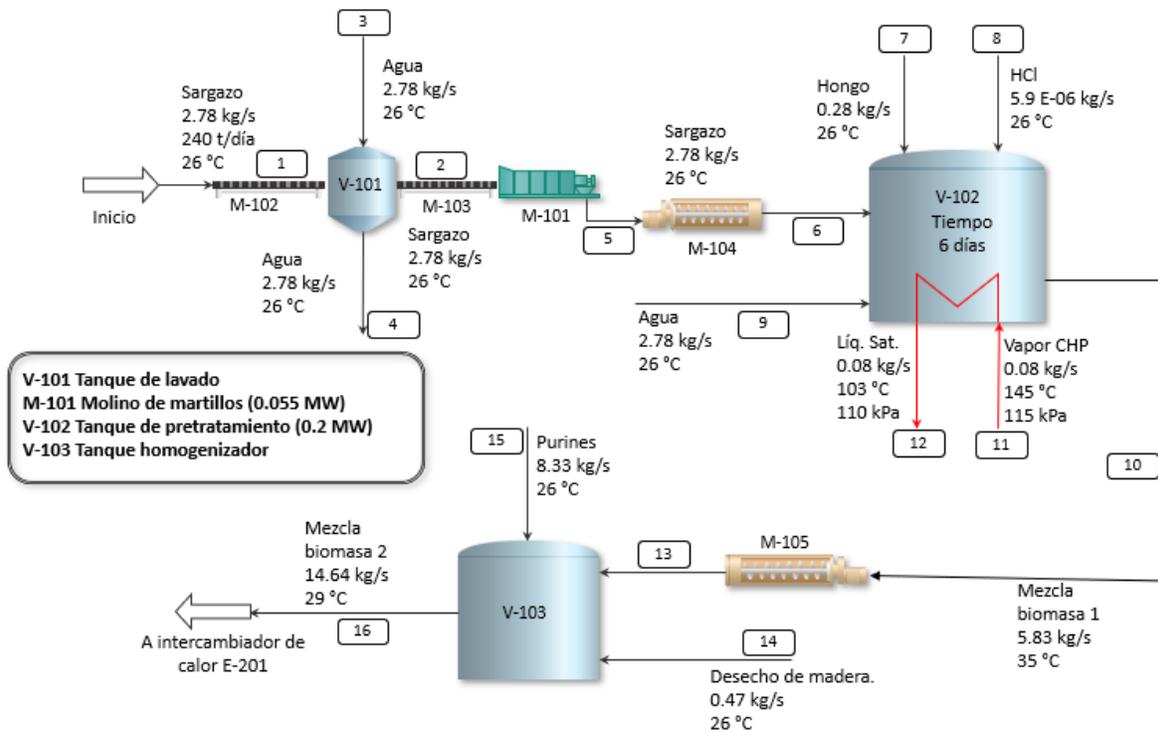


Figura 4.10. Esquema de flujo de proceso área: Pretratamiento de sargazo. Elaboración propia.

#### 4.5.3 Producción de biogás.

La mezcla de sargazo, purín de cerdo y aserrín son dirigidos al área “Producción de biogás” donde es generado el biocombustible que suplirá las demandas de energía térmica y eléctrica de la planta, también se genera el digestato que será tratado posteriormente para obtener fertilizante orgánico. Se presenta en la figura 4.11 el esquema de flujo de proceso correspondiente a la sección del área de la planta.

La mezcla de biomasa 2 tiene un contenido de sólidos totales de 9.66% parámetro adecuado para alimentarse al biodigestor cuyo valor límite para la digestión húmeda puede llegar a ser hasta del 15% (Abdulla, Senem, Ayah, Hani, & Kerstin, 2020), debido a que el biodigestor opera en condiciones termofílicas es necesario precalentar la alimentación a la temperatura de operación del biodigestor V-201, con esto se pretende evitar cambios bruscos de temperatura dentro del biodigestor que podrían afectar a los microorganismos responsables de la producción de biogás (Nachwachsede, 2010), por otra parte Ruiping (2016) recomienda el calentamiento externo de la biomasa en biodigestores termofílicos para asegurar una mejor transferencia de calor. La mezcla de biomasa 2

es enviada al intercambiador de calor E-201 donde se procede a calentar la corriente hasta 55 °C utilizando vapor procedente de la turbina de vapor K-502 del área de cogeneración. El flujo de vapor utilizado es de 0.58 kg/s a 145 °C y 115 kPa, el vapor después de ceder su energía sale del intercambiador E-201 como líquido saturado. La carga térmica del intercambiador de doble tubo es de 1,354 kW y está construido de acero inoxidable SS316 (HRS, 2020). El propósito del biodigestor es transformar parte del material orgánico de la biomasa a una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono por medio de bacterias en ausencia de oxígeno, al mismo tiempo se obtiene digestato residual que será tratado para obtener fertilizante orgánico. El biodigestor V-201 es alimentado con la corriente mezcla de biomasa 3 proveniente del calentador E-201 a 55 °C. Los parámetros de operación del biodigestor se presentan en la tabla 4.22, los valores presentados se encuentran dentro de los rangos recomendados en la literatura (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017); (Nachwachsende, 2010).

Tabla 4.22. Parámetros de operación del biodigestor V-201. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	55	°C
% Sólidos totales	9.66%	
Tiempo de retención	15	días
pH	7.0-7.7	
Carga de sólidos volátiles	2.92	kg SV/ (día*m <sup>3</sup> digestor)

El biodigestor es un tanque vertical agitado de 18,968 m<sup>3</sup> construido de acero al carbón con recubrimiento interno de acero inoxidable SS316 para evitar la corrosión. El proceso de digestión es termofílico por lo que opera a 55 °C, debido a que la biomasa ha sido precalentada, el biodigestor V-201 solo requiere de 271 kW térmicos para mantener su temperatura considerando que se encuentra aislado con fibra mineral de 15 cm de espesor (Nachwachsende, 2010). Para calentar el biodigestor se utiliza la energía térmica del vapor proveniente de la turbina de vapor K-502 en el área de cogeneración, el flujo del vapor requerido es de 0.12 kg/s a 145 °C y 115 kPa, esta corriente cede el calor al biodigestor V-201 y sale como líquido saturado a 101 °C y 105 kPa. La destrucción de sólidos volátiles es de 17.62% de acuerdo a lo calculado por el balance de materia.

### Área: Producción de biogás.

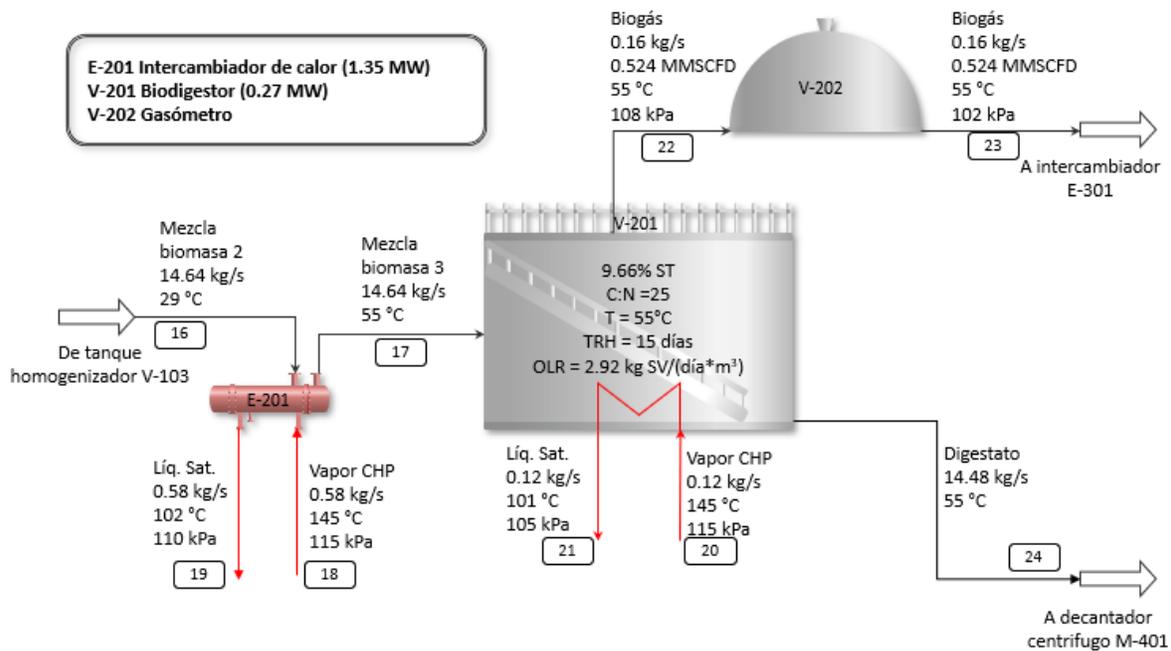


Figura 4.11. Esquema de flujo de proceso área: Producción de biogás. Elaboración propia.

El biogás obtenido a partir del sargazo tiene un contenido de metano en mol de 52% de acuerdo a los resultados obtenidos por Tapia-Tussell (2018), mientras el purín de cerdo tiene un contenido de metano en mol de 60% de acuerdo a lo reportado por Nagy & Wopera (2012). La concentración del  $H_2S$  en el biogás producido por el sargazo es de 0.006 % y por el purín porcino es de 0.7 % ambas reportadas por Irfan, Wahab, Sarni, Subur, & Akbar (2019) y Arellano L. (2017) respectivamente. El contenido de  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  y humedad utilizada para realizar los cálculos corresponde a los valores reportados en la literatura (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017); (Bruijstems, y otros, 2008); (Seadi, y otros, 2008). El biogás obtenido en el biodigestor V-201 tiene una composición en mol de 57.38%  $CH_4$ , 22.28%  $CO_2$ , 1.05%  $H_2$ , 1.07%  $O_2$ , 2.13%  $N_2$ , 0.53%  $H_2S$  y una humedad relativa de 100% a 55 °C y que corresponde a 15.6% mol.

El biodigestor tiene dos productos, el digestato y el biogás con un flujo másico de 14.48 kg/s y 0.16 kg/s respectivamente a 55°C y 108 kPa. El digestato será procesado para obtener fertilizante orgánico es la sección de tratamiento de digestato, mientras que el biogás será tratado y utilizado en la sección de cogeneración con el objetivo de obtener energía eléctrica y térmica.

El biogás obtenido y que no sea requerido inmediatamente en la sección de cogeneración pasa a ser almacenado en un gasómetro de baja presión de membrana doble con contrapresión por medio de aire comprimido suministrado por el soplador V-202 cuya potencia es de 3 kW a una presión manométrica de 2 kPa, mientras más parecida sea la producción y el consumo del biogás menor será el tamaño del gasómetro, se sugiere que el tamaño del gasómetro debe ser de al menos un 30% a un 50% de la producción diaria del biogás (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017). Para el caso estudiado se ha seleccionado un gasómetro que almacene el 50% de la producción diaria de biogás, la planta se diseña con la finalidad de que el consumo de biogás sea igual a la

producción, por lo que el objetivo del gasómetro es compensar las oscilaciones del flujo de biogás a lo largo del día.

#### 4.5.4 Tratamiento digestato.

Solo una pequeña parte de la biomasa tratada en el biodigestor V-201 es transformada en biogás, la gran mayoría de la biomasa sale del biodigestor como digestato. El objetivo del área "Tratamiento de digestato" es obtener un fertilizante orgánico que pueda ser comercializado, en la figura 4.12 se presenta el esquema de proceso referente a esta sección.

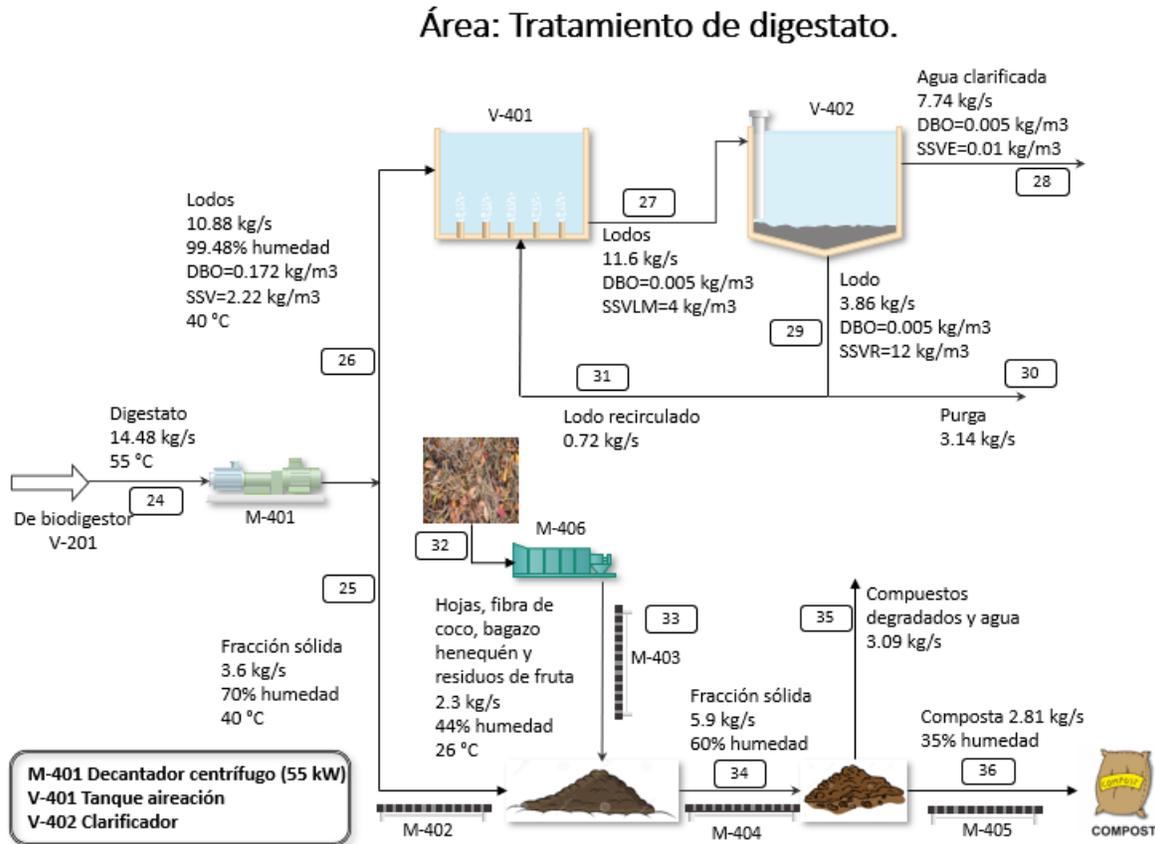


Figura 4.12. Esquema de flujo de proceso área: Tratamiento de digestato. Elaboración propia.

El biodigestor V-201 tiene dos corrientes de salidas, la primera es el biogás cuyo tratamiento y utilización se describen en el área de tratamiento de biogás y cogeneración, la segunda corriente es el digestato cuyo tratamiento permite obtener un fertilizante orgánico. En el proceso de digestión anaerobia una parte de los compuestos orgánicos es descompuesta, sin embargo, la parte mineral junto con la fracción restante de compuestos orgánicos no degradados sigue en el digestato por lo que contiene un elevado contenido de nutrientes (Farchverband Biogas, 2018). El primer paso para el tratamiento de la corriente de digestato con flujo másico de 14.48 kg/s a una temperatura de 55 °C es la separación en una fracción líquida bombeable y una fracción sólida apilable, Fichtner (2005) recomienda usar el decantador centrifugo para el digestato procedente de digestión húmeda. La corriente de digesto es enviada al decantador centrifugo M-401 el cual requiere una potencia de 55 kW, es en el decantador centrifugo donde se produce la separación mecánica de la fracción líquida y sólida por medio de un transportador helicoidal de rotación rápida el cual se encuentra dentro de

un tambor de tamizado de rotación más lenta. La fracción sólida tiene un contenido de materia seca del 30 % (Fichtner, 2005) y una recuperación de sólidos del 95 % utilizando floculantes (Suárez, Jácome, & Rodríguez, 2015), el contenido de humedad es un poco alto para el proceso de composta (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Por otra parte, la fracción líquida tiene un contenido en materia seca de 0.52 % valor que está en el rango reportado por Fichtner (2005).

La fracción sólida obtenida es enviada al proceso de composta, el proceso consiste en formar pilas (montículos) con la fracción sólida del digestato obtenido del decantador centrifugo M-401, las pilas tienen dimensiones de 3.5 m de alto por 20 m de ancho y una longitud de 150 m (Hafner & Reiser, 2018). Se coloca una membrana de polietileno en la base de cada pila para controlar el volumen del material y evitar la filtración de humedad del suelo, la membrana debe ser lo suficientemente amplia para cubrir el material por la parte superior ayudando a mantener la temperatura del sistema (Isaza, Pérez, Laines, & Castañon, 2009). Se requiere que la fracción sólida contenga una humedad entre 45% a 60% para el proceso de composta (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), para obtener la humedad objetivo se agrega a la fracción sólida del digestato cuyo flujo másico es de 3.6 kg/s, hojas recién caídas, hojas de dzidzilche, fibra de coco, bagazo de henequén y residuos de fruta, al mismo tiempo se mejora la relación C:N del material a compostar. Se agrega 2.3 kg/s de la mezcla compuesta por hojas, fibra de coco, bagazo de henequén y residuos de fruta cuyo contenido de humedad en la mezcla es de 44.38% y con una relación C:N de 56.9 para obtener una humedad inicial en el material a compostar del 60% con una relación C:N de 29.7 y un flujo másico de material a compostar de 5.9 kg/s. En la tabla 4.23 se presentan los datos de los materiales a mezclar, su flujo másico y la fracción masa.

Tabla 4.23. Sustratos a agregar a la fracción sólida del digestato. Elaboración propia.

Material para compost	Humedad	C:N	Cantidad [kg/s]	Fracción masa	Referencias
Hojas recién caídas	60.00%	60.00	1.05	0.45	(Rodríguez & Córdoba, 2006)
Hoja de dzidzilche	14.60%	24.00	0.84	0.36	(Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña, 2018)
Bagazo de henequén	6.90%	23.00	0.1	0.05	(Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña, 2018)
Fibra de coco	13.80%	253.00	0.1	0.05	(Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña, 2018)
Residuos de fruta	75.00%	35.00	0.21	0.09	(Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña, 2018)

El tamaño del material a agregar se disminuye a 5 cm antes de ser mezclado con la fracción sólida del digestato en el triturador cónico M-406, cuya potencia requerida es de 45 kW. El proceso de composta es un proceso aeróbico por lo que se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), debido a la

cantidad de material a compostar se opta por utilizar la aireación forzada. La aireación forzada consiste en proporcionar aire a través de canales construidos en el suelo para así mantener los niveles óptimos de oxígeno (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), los canales son de PVC hidráulico de 4 pulgadas de diámetro con perforaciones de 5 mm de diámetro a una distancia de 10 cm entre cada uno de ellos, el aire con flujo másico de 39.45 kg/s a 26 °C y 100 kPa será suministrado por 10 sopladores centrífugos cada uno con una potencia de 19 kW por lo que en total se utilizará 190 kW de energía eléctrica. La presión de descarga del aire es de 103 kPa, el aire se suministra 2 veces al día por 20 minutos, dejando un periodo de 30 min entre cada aireación (Isaza, Pérez, Laines, & Castañón, 2009). Para estimar la cantidad de aire requerida para el proceso de composta se utiliza la relación de 2 m<sup>3</sup> de aire/(h\*t de composta) reportada en Hafner & Reiser (2018). Para llevar a cabo las 4 etapas del proceso de composta (mesofílica I, termofílica, mesofílica II y maduración) se requiere de un periodo de 4 meses, durante este periodo es necesario voltear las pilas de composta pues a pesar de que la aireación se realiza por medio del soplador, las pilas de composta comienzan a compactarse lo que provoca inhibición en el proceso. El 1° volteo se realiza al terminar el primer mes, el 2° volteo al segundo mes, el 3° volteo a los tres meses y el 4° volteo a los 3 meses y medio (Isaza, Pérez, Laines, & Castañón, 2009). Los volteos se realizan mecánicamente utilizando cargadores frontales, volteadores laterales de tornillo o tractores adaptados con palas frontales (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Finalizando los 4 meses se obtiene un compost maduro (Hafner & Reiser, 2018) con un porcentaje de humedad del 35.5%, contenido de material orgánico del 77.64% y un flujo másico de 2.81 kg/s.

La fracción líquida del digestato obtenida del decantador centrifugo M-401 es enviada al tanque de aireación V-401, esta corriente tiene un flujo másico de 10.88 kg/s a 40°C, con una concentración de sólidos de 0.52% en masa, sólidos suspendidos volátiles SSV de 2.22 kg/m<sup>3</sup> y una demanda biológica de oxígeno de 0.172 kg/m<sup>3</sup>, el dato utilizado de DBO es obtenido de Soria (2001). La aireación consiste en la remoción biológica de la DBO en presencia de O<sub>2</sub> por microorganismos, el oxígeno requerido por el proceso se suministra por medio de sopladores de aire (CONAGUA, 2019) el flujo másico de aire es de 0.18 kg/s calculado de acuerdo a la metodología de CONAGUA (2019). En el tanque de aireación V-401 se mantiene en contacto la materia orgánica e inorgánica con los microorganismos, estos últimos estabilizan la materia orgánica por oxidación biológica (Chamorro & Vidal, 2015). El proceso tiene un tiempo de retención hidráulico de 7.4 horas y un tiempo de retención celular de 15 días. El tanque de aireación V-401 tiene un volumen de 307.5 m<sup>3</sup> y está construido de acero al carbón con recubrimiento de acero inoxidable SS316. Al tanque entran dos corrientes, la fracción líquida de digestato obtenida en el decantador centrifugo M-401 y la recirculación de lodos del clarificador V-402, se tiene una sola corriente de salida la cual alimenta el clarificador V-402. Para el diseño del tanque de aireación V-401 se siguió la metodología de CONAGUA (2019), se considera que la concentración de sólidos suspendidos volátiles en la mezcla de licor del tanque de aireación es de 4 kg/m<sup>3</sup>, mientras que los sólidos suspendidos volátiles en la recirculación son de 12 kg/m<sup>3</sup>.

La corriente que sale del tanque de aireación V-401 tiene un flujo másico de 11.6 kg/s, DBO igual a 0.005 kg/m<sup>3</sup> y SSVLM de 4 kg/m<sup>3</sup>, esta corriente es enviada al clarificador V-402. En el clarificador V-402 se lleva a cabo la separación de agua depurada y de un lodo el cual contiene a los microorganismos formados en el proceso de aireación. El lodo obtenido tiene un flujo másico de 3.86 kg/s, esta corriente es dividida en dos flujos, el primer flujo es la purga del sistema con un flujo másico de 3.14 kg/s y el segundo flujo es la recirculación de sedimento al tanque de aireación V-401 con un flujo másico de 0.72 kg/s ambas corrientes tienen una DBO de 0.005 kg/m<sup>3</sup> y unos sólidos suspendidos volátiles de 12 kg/m<sup>3</sup>. El sedimento recirculado al tanque de aireación V-401 sirve como siembra para que continúe el proceso aeróbico (CONAGUA, 2019). En el clarificador se obtiene una

corriente de agua cuyo flujo másico de 7.74 kg/s, el 71.8% del agua clarificada que correspondiente a 5.56 kg/s será utilizada en el área de pretratamiento de sorgazo específicamente en los equipos de lavado de sorgazo V-101 y en el tanque de pretratamiento V-102, el agua restante 2.18 kg/s puede ser utilizada para riego.

#### 4.5.5 Tratamiento de biogás.

El biogás obtenido en el biodigestor debe ser tratado para disminuir la humedad, el sulfuro de hidrógeno y posibles siloxanos antes de utilizarse en la turbina de gas. En la figura 4.13 y 4.14 se presenta el esquema de flujo de proceso del área “Tratamiento de biogás”.

El biogás debe ser enfriado a la temperatura adecuada de operación para las bacterias utilizadas en el proceso de desulfuración, generalmente los microorganismos son mesófilicos por lo que trabajan en el rango de temperaturas de 15 °C a 41 °C (Marin M. L., 2011), por otra parte Nachwachsende (2010) y Moreno (2014) indican que la temperatura óptima en la desulfuración con biofiltros percoladores se encuentra en el rango de 28°C a 34 °C. La temperatura de operación del biofiltro percolador T-301 es de 34 °C por lo que se encuentra en los rangos recomendados. Se hace pasar 0.16 kg/s de biogás al intercambiador de calor de doble tubo E-301 con carga térmica de 37 kW, el biogás pasa a través del tubo donde es enfriado de 55°C a 35 °C utilizando 2.1 kg/s de agua de servicio que entra a 26°C y sale a 30 °C. Debido al enfriamiento del biogás parte del agua contenida condensa por lo que se instala sobre las tuberías que lo transportan trampas de condensado para separar el agua, se logra eliminar 0.01 kg/s de agua.

El biogás enfriado es enviado al biofiltro percolador T-301 encargado de disminuir la concentración del H<sub>2</sub>S de 7,000 ppm hasta concentraciones por debajo de las 100 ppm. La oxidación del sulfuro de hidrógeno se lleva a cabo en condiciones aerobias por microorganismos autótrofos del género *Thiobacillus* (Marin M. L., 2011). El uso de microorganismos en la remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás se basa en la oxidación microbológica de H<sub>2</sub>S a S<sub>0</sub> (Morero, 2014). La tecnología consiste en un biofiltro empaquetado con un soporte sintético donde se forma una película microbiana, el tiempo de residencia en el biofiltro es de 3 minutos (Arellano L. , y otros, 2017). La corriente de biogás contaminado es inyectada en la parte inferior del biorreactor y atraviesa el lecho, al mismo tiempo por la parte superior se añade una solución recirculada encargada de aportar nutrientes, humedad, pH y eliminar los productos de degradación (Marin M. L., 2011). El funcionamiento de un biofiltro percolador es altamente dependiente de la naturaleza del material de relleno, habitualmente formado por materiales inorgánicos inertes, generalmente se utilizan polímeros, cerámicas, zeolita y carbón activado (Marin M. L., 2011). La demanda de oxígeno es suplida por aire ambiental el cual es inyectado por el soplador Q-303 con un requerimiento de potencia de 1 kW (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017), el volumen del aire suministrado corresponde al 3.7% del volumen de biogás a tratar de acuerdo a lo mencionado por Nachwachsende (2010). El aire inyectado tiene un flujo másico de 0.006 kg/s. Dentro del filtro percolador T-301 se lleva a cabo la reacción que produce azufre y agua, el flujo másico de biogás a la salida del filtro percolador T-301 es de 0.15 kg/s con temperatura de 34 °C y presión de 101.8 kPa. En esta sección se elimina 0.0016 kg/s de azufre y 0.0011 kg/s de agua, la concentración del sulfuro de hidrógeno en el biogás después de pasar por el biofiltro percolador T-301 es de 100 ppm.

### Área: Tratamiento de biogás.

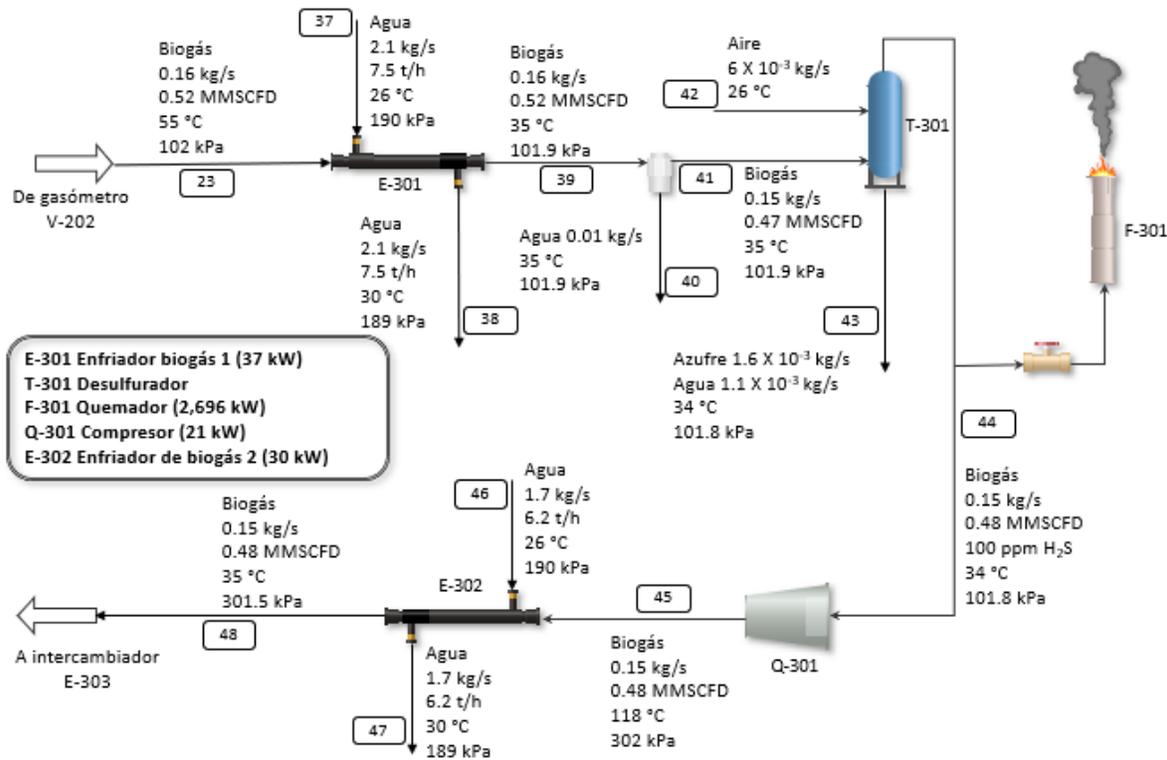


Figura 4.13. Esquema de flujo de proceso área: Tratamiento de biogás 1. Elaboración propia.

En la línea que lleva el biogás del filtro percolador T-301 al compresor Q-301 se coloca el quemador cerrado F-301 como parte de la seguridad del sistema, el quemador se encuentra después del filtro percolador T-301 para evitar que la combustión del biogás tenga un alto contenido de H<sub>2</sub>S. El quemador tiene una temperatura de salida para los gases de combustión menor a los 900 °C y el biogás quemado tiene un tiempo de residencia dentro del quemador Q-301 de 3 segundos (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

Una vez eliminado el sulfuro de hidrógeno a las concentraciones necesarias para utilizarlo en la turbina de gas se procede a remover el contenido de humedad restante por condensación del agua, el secado por condensación es conveniente para todas las tasas de flujo (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017). Para mejorar la condensación del agua se aumenta la presión del biogás a 302 kPa (Petersson & Willinger, 2009) utilizando el compresor recíprocante Q-301 con un requerimiento de potencia de 21 kW obteniendo biogás comprimido a 118 °C la cuál es una temperatura permitida a la salida de los compresores de gas cuya temperatura máxima de descarga es de 150 °C (Singh, s.f.).

El biogás a 118 °C y 302 kPa debe ser enfriado hasta 6 °C, para alcanzar estas condiciones de temperatura se utilizan los intercambiadores E-302 y E-303. El primer intercambiador E-302 es de doble tubo y disminuye la temperatura del biogás de 118 °C a 35 °C utilizando agua proveniente de la torre de enfriamiento T-501 con un flujo másico de 1.7 kg/s de agua, el flujo de agua entra al intercambiador E-302 a 26 °C y 190 kPa donde absorbe energía del biogás para salir a 30 °C y 189 kPa. La corriente de biogás transfiere 30 kW térmicos a la corriente de agua disminuyendo la temperatura del biogás a 35 °C. Después de esta primera etapa de enfriamiento el biogás es dirigido

al intercambiador de calor E-303 también de doble tubo para disminuir su temperatura a 6 °C utilizando agua fría proveniente del área de refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O. Se hacen pasar 1.53 kg/s de agua a 3°C y 189 kPa para enfriar la corriente de biogás de 35 °C a 6 °C, la corriente de agua fría sale del intercambiador E-303 a 4.7 °C y 188 kPa. El intercambiador de calor E-303 tiene una carga térmica de 12 kW.

Para retirar el agua condensada del biogás a 6 °C y 301 kPa se colocan trampas de condensado en las líneas de tuberías; las tuberías deben tener un pequeño ángulo de inclinación para poder separar fácilmente el agua en las trampas (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017). El enfriamiento del biogás remueve parte de los siloxanos presentes en el biogás, sin embargo, no garantiza una remoción adecuada de este compuesto. El agua retirada del biogás por las trampas de condensados es de 0.0057 kg/s de agua.

El biogás con flujo másico de 0.15 kg/s a 6 °C y 301 kPa debe ser calentado antes de ser enviado a la unidad de eliminación de siloxanos con la finalidad de reducir la humedad relativa y por lo tanto reducir la cantidad de agua adsorbida en los equipos de adsorción de siloxanos (United States Patente n° US 20150209717 A1, 2015). El biogás se calienta en el intercambiador de calor de doble tubo E-304 a 15 °C utilizando el vapor de la turbina de vapor K-502 del área de cogeneración. El flujo de vapor utilizado es de 0.0008 kg/s a 145 °C y 115 kPa, el vapor transfiere 2 kW de energía térmica al biogás elevando su temperatura a 15 °C, a la salida del intercambiador de calor E-304 el vapor pasa a ser líquido saturado a 103 °C y 114 kPa.

### Área: Tratamiento de biogás.

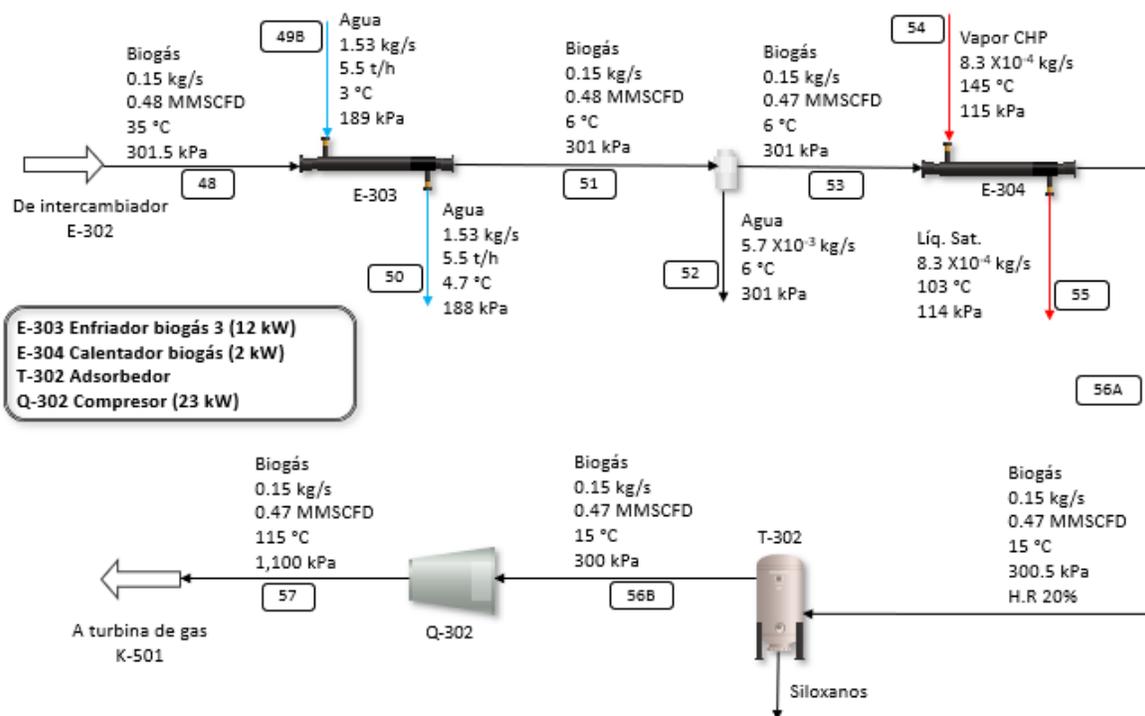


Figura 4.14. Esquema de flujo de proceso área: Tratamiento de biogás 2. Elaboración propia.

El biogás a 15 °C y 300.5 kPa pasa a la torre adsorbadora T-302, equipo utilizado para remover siloxanos del biogás. La etapa de condensación de agua por refrigeración es un pretratamiento para

eliminar siloxanos que mejora la eficiencia de la torre adsorbidora T-302 (Soreanu, y otros, 2011). La torre adsorbidora T-302 utiliza zeolitas como medio adsorbente, tiene un tiempo de residencia de 5 segundos y se encuentra a la temperatura de 15 °C (United States Patente nº US 20150209717 A1, 2015). La saturación de las zeolitas disminuye la capacidad de adsorción de siloxanos por lo que debe regenerarse en un periodo máximo de 6 meses (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017).

El biogás con flujo másico de 0.15 kg/s, temperatura de 15 °C, presión de 300 kPa y 20% de humedad relativa se comprime hasta 1,100 kPa en el compresor recíprocante Q-302 con un requerimiento de energía de 23 kW, debido a la compresión el biogás sale a 115°C. La composición en mol del biogás obtenido es de 65.86 % CH<sub>4</sub>, 25.36% CO<sub>2</sub>, 1.21% H<sub>2</sub>, 1.64% O<sub>2</sub>, 5.59% N<sub>2</sub>, 0.33% H<sub>2</sub>O y 0.01% H<sub>2</sub>S.

#### 4.5.6 Cogeneración.

El biogás obtenido en el área de tratamiento de biogás es utilizado en la turbina de gas Saturn 20 para generar electricidad y calor a través de un ciclo combinado acoplado a cogeneración. La figura 4.15 presenta el esquema de flujo de proceso del área de "Cogeneración". El biogás producido no es suficiente para satisfacer la demanda térmica del proceso por lo que se utiliza gas natural para complementar el combustible faltante que será utilizado en la turbina de gas Saturn 20.

Una corriente de aire es alimentada a la sección de compresión de la turbina de gas K-501 con un flujo másico de 6.3 kg/s a 26 °C y 100 kPa, el compresor aumenta la presión del aire hasta 1,100 kPa; debido a la compresión el aire alcanza una temperatura de 311°C. El aire se introduce a la cámara de combustión de la turbina de gas K-501 donde se mezcla con 0.15 kg/s de biogás a 113 °C y 1,100 kPa proveniente del compresor Q-302 y gas natural con flujo másico de 0.045 kg/s a 26 °C y 1,100 kPa. El biogás y el gas natural son introducidos a la cámara de combustión por medio del sistema de inyección, en la cámara de combustión se aumenta la temperatura debido al proceso de combustión. El aire suministrado a la turbina de gas se encuentra en exceso para realizar la combustión completa (Rueda, y otros, 2011), para el caso estudiado el exceso de aire es del 343% respecto al requerido por la estequiometría de la reacción. Los gases de combustión salen de la cámara de combustión con un flujo másico de 6.5 kg/s a una temperatura y presión de 994 °C y 1,100 kPa respectivamente, estos gases ahora se dirigen a la sección de expansión de la turbina donde se reduce la presión hasta 101 kPa con una temperatura de 535 °C generando 3,642 kW de potencia, sin embargo, el compresor de aire requiere 2,492 kW de potencia por lo que la potencia entregada por la turbina de gas K-501 es de 1,150 kW. La simulación de la turbina de gas K-501 se realiza de acuerdo a las especificaciones técnicas de la turbina comercial Saturn 20 (2009).

Los gases exhaustos que salen de la turbina de gas K-501 son dirigidos al equipo de recuperación de calor HRSG E-501, en este equipo los gases de combustión transfieren calor a la corriente de agua del ciclo Rankine para producir vapor el cual es utilizado por la turbina de vapor K-502 para generar electricidad. Los gases exhaustos entran al sobrecalentador a 535 °C y 101 kPa para transferir 0.29 MW térmicos a la corriente de agua y salir del sobrecalentador a 497 °C y 100.8 kPa, el sobrecalentador utilizado es horizontal de tubos verticales (Alston, 2012). La corriente de gas que sale del sobrecalentador pasa ahora por el evaporador transfiriendo 2.12 MW térmicos, los gases de combustión salen del evaporador a 209 °C y 100.6 kPa, el evaporador utilizado es del tipo O-Frame horizontal (Polonsky, Tarasov, & Gorr, 2019). Por último los gases exhaustos pasan a través del economizador y transfieren 0.51 MW térmicos, los gases exhaustos salen a 136 °C y 100 kPa, el economizador es del mismo tipo que el sobrecalentador y evaporador.

En el recuperador de calor HRSG E-501 por el lado del ciclo Rankine entran 1.03 kg/s de agua a 60 °C y 900 kPa impulsados por la bomba centrífuga P-501 al economizador, en el economizador se transfiere energía de los gases de combustión al agua por lo que a la salida del economizador tenemos líquido saturado a 173 °C y 850 kPa. El agua que proviene del economizador pasa por el evaporador absorbiendo energía de los gases y saliendo del evaporador como vapor saturado a 173 °C y 850 kPa. En el sobrecalentador la temperatura del vapor se eleva y se obtiene vapor sobrecalentado a 310 °C con una presión de 800 kPa.

El vapor sobrecalentado es utilizado en la turbina de vapor K-502 expandiéndose a una presión 115 kPa con una temperatura de 145 °C y generando 320 kW. La turbina de vapor es del tipo a contrapresión, esto implica que la presión de descarga es mayor a la presión atmosférica (Almasi, 2016).

El vapor que sale de la turbina de vapor K-502 es aprovechado en un esquema de cogeneración para suplir los requerimientos térmicos de los siguientes equipos de proceso: Tanque de pretratamiento V-102, intercambiador de calor E-201, biodigestor V-201, calentador de biogás E-304 y generador E-601. Se tiene disponible 1.03 kg/s de vapor a 115 kPa y 145 °C, 0.12 kg/s son utilizados para calentar el biodigestor V-201 del área producción de biogás y transferir 0.27 MW de energía térmica requerida, 0.58 kg/s se utilizan en el calentador E-201 para calentar la biomasa que se alimentara al biodigestor transfiriendo 1.35 MW térmicos, 0.11 kg/s se utilizan en el generador E-601 del área ciclo de refrigeración por absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O para transferir 0.25 MW de energía térmica, 0.00083 kg/s son utilizados en el calentador de biogás E-304 del área tratamiento de biogás para transferir 0.002 MW, 0.08 kg/s son requeridos en el tanque de pretratamiento V-102 del área pretratamiento de sorgazo para transferir 0.2 MW de energía térmica, los restantes 0.14 kg/s de vapor no son utilizados en el proceso. El flujo de vapor utilizado para suplir la energía térmica requerida por los equipos antes mencionados es el necesario para obtener líquido saturado a la salida del equipo que recibe la energía.

Las corrientes de líquido saturado obtenidas después del calentamiento de los equipos se mezclan con el vapor que no fue requerido en el proceso formando una mezcla con calidad de vapor de 0.14 a 101 °C y 105 kPa. La mezcla líquido/vapor de agua es enviada al condensador de tubos y coraza E-502, en el condensador el agua fría circula por los tubos y la mezcla líquido/vapor a condensar circula por la coraza, a la salida se obtiene líquido saturado correspondiente a la presión de operación del condensador, para el proceso descrito la presión en el condensador es de 20 kPa por lo que el agua saturada se encuentra a 60.18 °C. El enfriamiento de la mezcla líquido/vapor de agua se realiza utilizando agua cuyo flujo másico es de 8.65 kg/s a una temperatura de 26 °C y 190 kPa de presión, después de absorber la energía de rechazo del ciclo, el agua sale a 40 °C y 189 kPa, la carga térmica del condensador es de 0.52 MW.

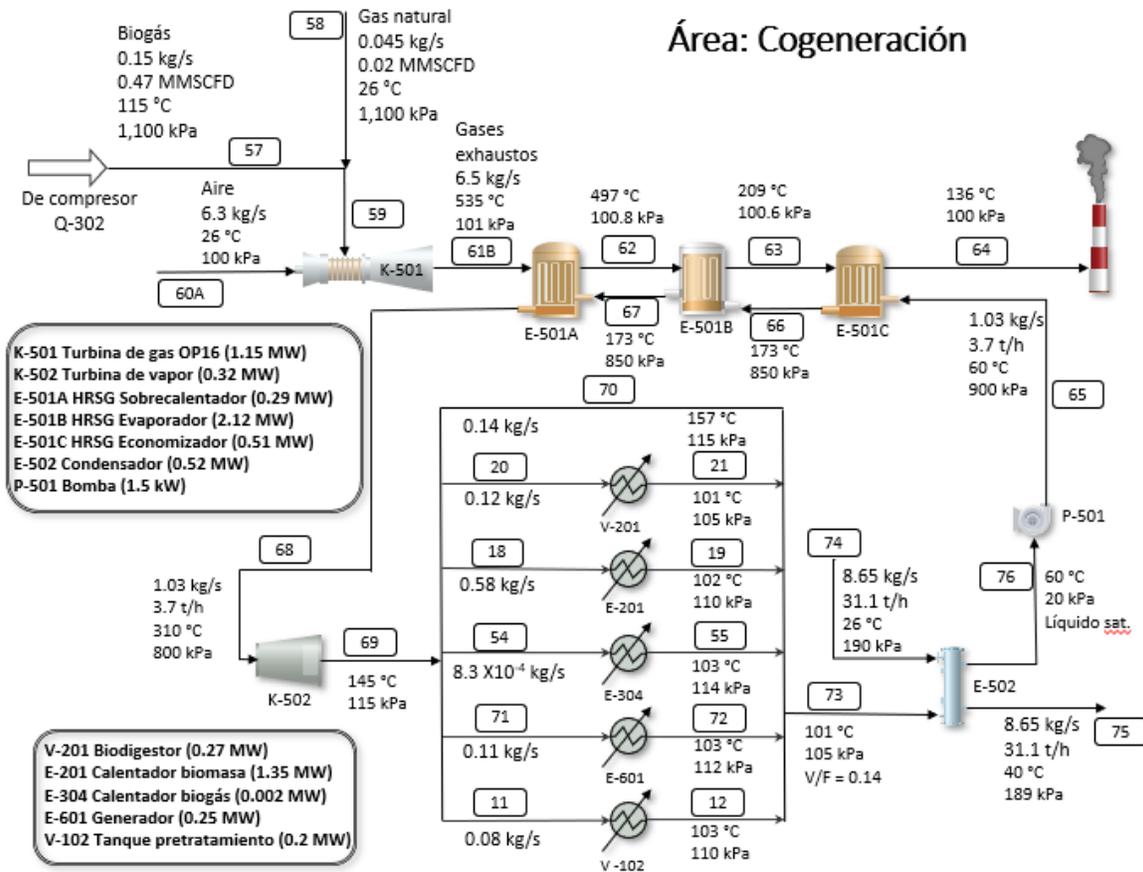


Figura 4.15. Esquema de flujo de proceso área: cogeneración. Elaboración propia.

La torre de enfriamiento T-501 es una torre de tiro inducido utilizada para suplir los servicios de agua a 26 °C en el proceso. El funcionamiento general de la torre consiste en la succión de una corriente de aire mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre, la transferencia de calor se da entre el agua a una mayor temperatura y el aire a menor temperatura los cuales fluyen a contracorriente en el relleno de la torre, el propósito del relleno en la torre es aumentar la superficie y el tiempo de contacto entre el aire y el agua fomentando la eficiencia del enfriamiento (Arnabat, 2018). El flujo total de agua entregada por la torre de enfriamiento T-501 es de 34.61 kg/s equivalente a 124.6 m<sup>3</sup>/h, el detalle de los flujos se presenta en la sección 4.7.3.

#### 4.5.7 Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O.

El proceso en el área de “tratamiento de biogás” requiere de agua fría para disminuir la temperatura del biogás a 6 °C, el agua fría es producida en el área de “refrigeración por absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O” utilizando el calor residual del vapor generado por la turbina de vapor K-502. En la figura 4.16 se presenta el esquema de flujo de proceso de la refrigeración por absorción.

### Área: Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O.

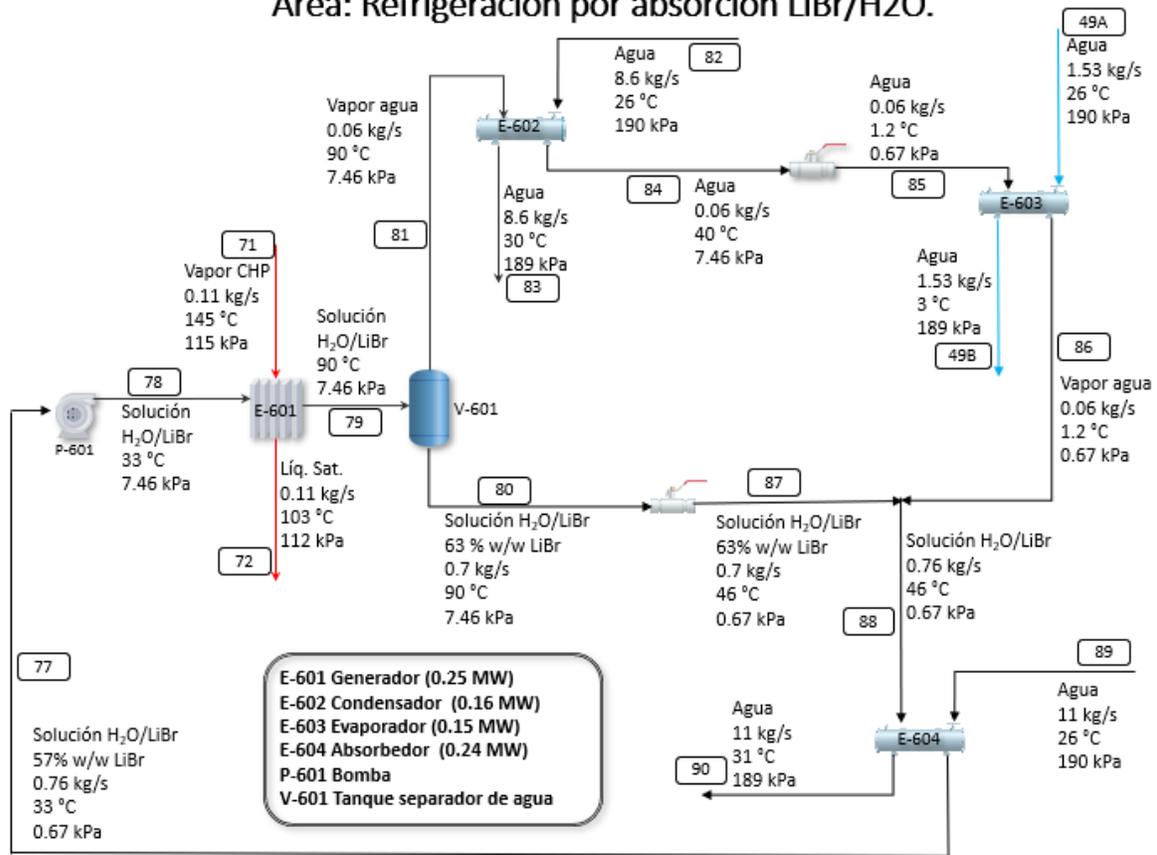


Figura 4.16. Esquema de flujo de proceso área: refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O. Elaboración propia.

Una solución de bromuro de litio y agua con flujo másico de 0.76 kg/s a 33 °C con una presión de 0.67 kPa y una concentración de 57 % [w/w] es enviada a la bomba P-601 la cual aumenta la presión de la disolución a 7.46 kPa. El bromuro de litio es el absorbente mientras que el agua es el fluido refrigerante (Tawalbeth, y otros, 2020).

La disolución es calentada en el generador E-601 hasta 90 °C utilizando el calor residual del vapor de la turbina K-502, el flujo másico de vapor que entra al generador es de 0.11 kg/s a 145 °C y 115 kPa, a la salida del generador obtenemos líquido saturado a 103 °C y 112 kPa, la carga térmica del generador es de 0.25 MW. La función del generador es agregar el calor suficiente para separar parte del refrigerante en la fase gaseosa (Somers, y otros, 2011).

La solución caliente pasa al tanque separador V-601 cuyo objetivo es obtener una fase gaseosa compuesta por agua (refrigerante) con flujo másico de 0.06 kg/s a 90 °C y 7.46 kPa y una fase líquida formada por la solución concentrada de LiBr/H<sub>2</sub>O con flujo másico de 0.7 kg/s a 90 °C y 7.46 kPa, la solución de LiBr/H<sub>2</sub>O pasa de 57% [w/w] a 63 % [w/w] (Somers, y otros, 2011).

El vapor de agua es enviado al condensador E-602 donde rechaza calor a una corriente de agua que entra 26 °C con una presión de 190 kPa y un flujo másico de 8.6 kg/s para salir a 30 °C y 189 kPa, el vapor de agua proveniente del tanque separador V-601 pasa a fase líquida a 40 °C y 7.46 kPa. La carga térmica del condensador E-602 es de 0.16 MW.

El agua líquida obtenida pasa a través de una válvula para disminuir su presión de 7.46 kPa a 0.67 kPa, debido a la reducción de la presión su temperatura cambia a 1.2 °C, el objetivo de disminuir la presión es abatir la temperatura de ebullición del agua. El agua es enviada al evaporador E-603 donde es evaporada utilizando la energía de la corriente líquida que será refrigerada, la carga térmica del evaporador es de 0.15 MW. La corriente a refrigerar cede su calor para evaporar el agua líquida del ciclo proveniente de la válvula, el flujo de agua a enfriar es el requerido para utilizar en el área de tratamiento de biogás en el intercambiador de calor E-303. El flujo másico del agua a enfriar es de 1.53 kg/s el cual entra al evaporador E-603 a una temperatura de 26 °C y 190 kPa, a la salida del evaporador E-603 esta corriente se encuentra a 3°C y 189 kPa. La corriente de agua del ciclo al estar a muy baja presión utiliza el calor cedido por el agua a 26 °C para evaporarse, a la salida del evaporador E-603 el agua se encuentra como vapor saturado a 1.2 °C y 0.67 kPa.

La solución concentrada obtenida en el tanque V-601 pasa por una válvula para disminuir la presión de 7.45 kPa a 0.67 kPa, la temperatura también disminuye de 90 °C a 46 °C (Somers, y otros, 2011). La solución concentrada proveniente de la válvula y el vapor de agua proveniente del evaporador E-603 fluyen hacia el absorbedor E-604, es en este equipo donde el vapor de agua es absorbido por el LiBr debido a su afinidad por el agua (ABSORSISTEM, s.f.) diluyendo la concentración de la solución a 57 % [w/w]. Para enfriar la solución a la temperatura inicial del ciclo se utiliza una corriente de agua en el absorbedor E-604 con flujo másico de 11 kg/s la cual entra a 26 °C y 190 kPa, esta corriente absorbe calor y sale 31 °C y 189 kPa, al mismo tiempo la solución diluida se enfría a 33°C, la carga térmica del absorbedor es de 0.24 MW. Finalmente, la solución diluida a 33°C y 0.67 kPa es succionada por la bomba P-601 aumentando su presión a 7.46 kPa y enviándola al generador E-601 para reiniciar el ciclo.

Los balances de materia y energía, simulaciones de proceso, diseño de equipos y cálculos para todas las áreas de la planta se presentan en los anexos A, B, C, D y E.

## 4.6 Lista de equipo.

En la tabla 4.24 se presenta la lista de equipos del proyecto ordenada por las áreas del proyecto descritas en la sección 4.5.

Tabla 4.24. Lista de equipo. Elaboración propia.

<b>Título de proyecto:</b>		Opciones tecnológicas para el aprovechamiento del sargazo en el Caribe Mexicano			<b>Nombre del escenario:</b>		Proyecto biogás		<b>Preparado por:</b>	RSG
<b>Nombre del proyecto:</b>		Biogás con sargazo y purín porcino.			<b>Clase del estimado:</b>		Clase IV			
<b>Fecha:</b>		abr-21			<b>Localización del proyecto:</b>		Yucatán			
#	Área	Tag	Equipo	Tipo	Material	Energía [kW]	Volumen [m³]	Área [m²]	Dimensiones [m]	Peso [kg]
1	Pretratamiento de sargazo	V-101	Tanque de lavado	Vertical	SS316	-	1.08	-	Diámetro: 0.9m Altura: 1.7m	310
2	Pretratamiento de sargazo	M-101	Molino	Molino de martillos	A285C	55.00	-	-	-	2,100
3	Pretratamiento de sargazo	M-102	Transportador	Cinta transportadora cerrada	CS	1.00	-	-	Longitud: 20m Ancho banda: 0.45m	1,542
4	Pretratamiento de sargazo	M-103	Transportador	Cinta transportadora cerrada	CS	1.00	-	-	Longitud: 20m Ancho banda: 0.45m	1,542
5	Pretratamiento de sargazo	M-104	Transportador	Tornillo sinfín	CS	2.22	-	-	Longitud: 20m Diámetro tornillo: 0.24m	1,800

6	Pretratamiento de sargazo	M-105	Transportador	Tornillo sinfín	SS316	5.50	-	-	Longitud: 20m Diámetro tornillo: 0.24m	1,900
7	Pretratamiento de sargazo	V-102	Tanque pretratamiento	Vertical	CS con recubrimiento SS316	195.00	3,780.00	-	Diámetro: 20m Altura: 12.2m	84,500
8	Pretratamiento de sargazo	V-103	Tanque homogenizador	Vertical	SS316	-	633.00	-	Diámetro: 9.5m Altura: 9.8m	21,200
9	Producción biogás	E-201	Calentador biomasa	Doble tubo	SS316	1,357.00	-	33.00	Longitud: 6m	7,380
10	Producción biogás	V-201	Biodigestor	Vertical	CS con recubrimiento SS316	271.00	18,968.00	-	Diámetro: 41m Altura: 14.6m	462,700
11	Producción biogás	V-202	Gasómetro	De membrana doble	Membranas de polímero	-	6,881.00	-	-	-
12	Tratamiento biogás	E-301	Enfriador biogás 1	Doble tubo	SS316	37.00	-	2.60	Longitud: 1.2m	160
13	Tratamiento biogás	T-301 A/B	Desulfurador (2 equipos)	Biofiltro percolador	SS316/Empaque PVC	-	30.00	-	Diámetro: 2.75m Altura: 5.05m	10,200
14	Tratamiento biogás	Q-303	Soplador desulfurador	General	CS	1.00	-	-	-	270
15	Tratamiento biogás	F-301	Quemador	Quemador elevado	A283C	2,696.00	-	-	Altura: 10.4m	470
16	Tratamiento biogás	Q-301	Compresor biogás 1	Reciprocante	A285C	21.00	-	-	-	4,400
17	Tratamiento biogás	E-302	Enfriador biogás 2	Doble tubo	SS316	30.00	-	0.81	Longitud: 0.9m	100
18	Tratamiento biogás	E-303	Enfriador biogás 3	Doble tubo	SS316	12.00	-	1.92	Longitud: 3m	120

19	Tratamiento biogás	E-304	Calentador biogás	Doble tubo	SS316	2.00	-	0.03	Longitud: 0.9m	60
20	Tratamiento biogás	T-302 A/B	Adsorbedor (2 equipos)	Zeolitas	A285C	-	0.30	-	Diámetro: 0.75m Altura: 0.67m	1,160
21	Tratamiento biogás	Q-302	Compresor biogás 2	Reciprocante	A285C	23.00	-	-	-	4,400
22	Digestato	M-401	Decantador	Centrifugo	A285C	55.00	-	-	Diámetro: 0.6m Longitud: 2.4m	5,600
23	Digestato	Q-401	Soplador composta (10 equipos)	Centrífugo	CS	190.00	-	-	-	2,700
24	Digestato	M-402	Transportador	Cinta transportadora abierta	CS	1.50	-	-	Longitud: 50m Ancho banda: 0.5m	2,041
25	Digestato	M-403	Transportador	Cinta transportadora abierta	CS	1.50	-	-	Longitud: 50m Ancho banda: 0.5m	2,041
26	Digestato	M-404	Transportador	Cinta transportadora abierta	CS	1.50	-	-	Longitud: 50m Ancho banda: 0.5m	2,041
27	Digestato	M-405	Transportador	Cinta transportadora abierta	CS	1.50	-	-	Longitud: 50m Ancho banda: 0.5m	2,041
28	Digestato	M-406	Triturador	Cónico	CS	45.00	-	-	-	8,300
29	Digestato	V-401	Tanque aireación	Vertical	SS316	5.65	307.50	-	Diámetro: 7m Altura: 9.75m	10,400
30	Digestato	Q-402	Soplador tanque aireación	General	CS	7.25	-	-	-	440
31	Digestato	V-402	Clarificador	Vertical	SS316	-	113.00	-	Diámetro: 6m Altura: 4m	10,700

32	Cogeneración	K-501	Turbina de gas	Saturn 20	A285C	1,150.00	-	-	Longitud: 4.7m Ancho: 1.9m	6,805
33	Cogeneración	K-502	Turbina de vapor	Contrapresión	A285C	320.00	-	-	-	2,600
34	Cogeneración	E-501	Caldera de recuperación HRSG	Horizontal con tubos verticales	A285C	2,925.00	-	30.23	-	15,400
35	Cogeneración	P-501	Bomba de condensados	Centrífuga	CS	1.50	-	-	-	130
36	Cogeneración	P-502	Bomba de torre de enfriamiento (2 equipos)	Centrífuga	CS	22.00	-	-	-	130
37	Cogeneración	E-502	Condensador	Tubo y coraza	tubos A214, coraza A285C	523.00	-	13.00	Longitud: 4m	650
38	Cogeneración	T-501	Torre de enfriamiento	Tiro inducido	GALV	7.50	-	-	-	2,900
39	Refrigeración por absorción	P-601	Bomba LiBr	Centrífuga	CS	0.03	-	-	-	130
40	Refrigeración por absorción	E-601	Generador	De placas	A214	251.00	-	13.00	Longitud: 3m	750
41	Refrigeración por absorción	E-602	Condensador	Tubo y coraza	tubos A214, coraza A516	158.00	-	15.00	Longitud: 3m	780
42	Refrigeración por absorción	E-603	Evaporador	Tubo y coraza	tubos A214, coraza A516	148.00	-	20.00	Longitud: 4m	920
43	Refrigeración por absorción	E-604	Absorbedor	Tubo y coraza	tubos A214, coraza A516	240.00	-	28.00	Longitud: 4m	1,200
44	Refrigeración por absorción	V-601	Tanque separador de agua	Horizontal	SS316	-	255.00	-	Diámetro: 4.5m Altura: 16m	21,700

## 4.7 Requerimientos de servicios auxiliares del proceso.

### 4.7.1 Electricidad.

La planta es autosuficiente en sus requerimientos eléctricos generando una potencia eléctrica de 1.47 MW de la cual el 37.8% se utiliza como usos propios y corresponde a una potencia de 0.556 MW. En la tabla 4.25 se presentan las necesidades eléctricas de la planta por equipo.

Tabla 4.25. Requerimientos de electricidad. Elaboración propia.

Equipo	Tag	Electricidad [kW]	Fuente
Molino de martillos	M-101	55.00	(Couper, Penny, Fair, & Walas, 2010) (Ezurike, Osazuka, Okoronkwo, & Okoji, 2018)
Cinta transportadora cerrada	M-102	1.00	Aspen Capital Cost
Cinta transportadora cerrada	M-103	1.00	Aspen Capital Cost
Tornillo sin fin	M-104	2.30	Aspen Capital Cost
Tornillo sin fin	M-105	5.50	Aspen Capital Cost
Agitador tanque de pretratamiento	V-102	30.00	(Nachwachsende, 2010)
Agitador tanque homogenizador	V-103	20.00	(Nachwachsende, 2010)
Agitador biodigestor	V-201	60.00	(Nachwachsende, 2010)
Soplador gasómetro	V-202	3.00	(SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017)/Aspen Hysys
Soplador tanque aireación	Q-402	5.65	(CONAGUA, 2019)
Decantador centrífugo	M-401	55.00	(Wuxi Shuhang Machinery Science & Technology Co., Ltd., 2020)
Soplador proceso composta (10 equipos)	Q-401	190.00	Aspen Hysys
Cinta transportadora abierta	M-402	1.50	Aspen Capital Cost
Cinta transportadora abierta	M-403	1.50	Aspen Capital Cost
Cinta transportadora abierta	M-404	1.50	Aspen Capital Cost
Cinta transportadora abierta	M-405	1.50	Aspen Capital Cost
Triturador	M-406	45.00	Aspen Capital Cost
Soplador desulfurador	Q-303	1.00	Aspen Hysys
Compresor	Q-301	21.00	Aspen Hysys
Compresor	Q-302	23.00	Aspen Hysys
Bomba de condensados	P-501	1.5	Aspen Hysys
Bomba torre de enfriamiento (2 equipos)	P-502	22.00	Aspen Capital Cost

Ventiladores torre de enfriamiento	T-501	7.50	Aspen Capital Cost
Bomba LiBr	P-601	1.00	Aspen Hysys
<b>TOTAL</b>		<b>556.45</b>	

#### 4.7.2 Vapor.

Las necesidades de vapor de la planta son suministradas por el área de cogeneración. En la tabla 4.26 se presentan los flujos de vapor utilizados y la energía térmica requerida por los equipos.

Tabla 4.26. Requerimientos de vapor. Elaboración propia.

Equipo	Tag	Flujo de vapor [kg/s]	Energía [kW]
Biodigestor	V-201	0.12	271
Calentador de biomasa	E-201	0.58	1,357
Calentador de biogás	E-304	8.30E-04	2
Generador	E-601	0.11	258
Tanque de pretratamiento	V-102	0.08	195
<b>TOTAL</b>		<b>0.89</b>	<b>2,083</b>

#### 4.7.3 Agua.

El agua de servicio a 26 °C utilizada en el proceso es proporcionada por la torre de enfriamiento T-501. En la tabla 4.27 se listan los flujos requeridos por equipo.

Tabla 4.27 Requerimientos de agua de servicio a 26 °C. Elaboración propia.

Equipo	Tag	Agua [kg/s]
Enfriador de biogás 1	E-301	2.10
Enfriador de biogás 2	E-302	1.70
Condensador	E-502	8.65
Condensador	E-602	8.60
Evaporador	E-603	1.53
Absorbedor	E-604	11.00
Agua del ciclo	-	1.03
<b>Total</b>		<b>34.61</b>

#### 4.7.4 Químicos.

Los químicos utilizados en el proceso es el HCl en el tanque de pretratamiento V-102 con un flujo másico de  $5.9 \times 10^{-6}$  kg/s y el floculante utilizado en el decantador centrífugo M-401 con flujo volumétrico de  $1.5 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup> de floculante/m<sup>3</sup> de lodo (Jardinitis, 2018).

#### 4.8 Programa general del proyecto.

El programa de proyecto se desarrolla utilizando como datos las HH de la ingeniería básica, ingeniería de detalle y construcción estimadas por Aspen Capital Cost y siguiendo la metodología presentada en Navarrete & Cole (2001). En la tabla 4.28 se presenta los resultados para la duración de la ingeniería básica, ingeniería de detalle y construcción.

Tabla 4.28. Duración de la construcción e ingeniería. Elaboración propia.

<b>Horas de construcción Aspen</b>	100,336
<b>Duración de la construcción [meses]</b>	8
<b>Duración ingeniería de detalle [meses]</b>	3
<b>Duración construcción + ingeniería de detalle [meses]</b>	11
<b>HH ingeniería básica Aspen Capital Cost</b>	10,080
<b>HH laboradas por mes por persona</b>	160
<b>Ingenieros para ingeniería básica</b>	17
<b>Duración ingeniería básica [meses]</b>	4

En la figura 4.17 se presenta el programa general propuesto para el proyecto de *Opciones tecnológicas para el aprovechamiento del sorgazo en el Caribe Mexicano* con una duración total estimada de proyecto de 1.6 años.



Figura 4.17. Programa general del proyecto. Elaboración propia.

#### 4.9 Estrategia de contratación.

Este trabajo solo incluye el desarrollo de la ingeniería conceptual por lo que el alcance del proyecto y el programa general aún son preliminares, sin embargo, se tiene una buena idea del costo y la duración del proyecto. La tecnología utilizada en el proceso es una tecnología madura y ampliamente estudiada por lo que los contratistas con la capacidad de realizar los trabajos contarán con la experiencia y conocimiento para desarrollar el proyecto, esto implica que tendrán una menor aversión al riesgo (Romero P., 2016). Otro aspecto a tomar en cuenta es el tamaño del proyecto, considerando las horas hombres requeridas para la ingeniería (37,517 HH) y construcción (80,816 HH) el proyecto puede clasificarse como pequeño de acuerdo con Navarrete & Cole (2001) por lo

que es factible asignar los trabajos a un solo contratista para facilitar la gestión y comunicación del proyecto. Por lo tanto, la estrategia de contratación para el proyecto se asume como un solo contrato de servicios EPC (llave en mano) bajo la modalidad de pago a precio alzado, el contratista debe contar con experiencia en la construcción de plantas de biogás y producción de biofertilizante.

#### 4.10 Estimado de costos.

##### 4.10.1 Tipo de estimado de costo.

El estimado de costos es una herramienta clave para evaluar proyectos de inversión, consiste en una predicción de los recursos monetarios requeridos para realizar el proyecto basada en la cantidad y calidad de información disponible en un momento dado (Biggeri & Soledad, 2018). En la tabla 4.29 se presentan las principales características de los estimados de costos.

Tabla 4.29. Clasificación de estimado de costo. Obtenido de Association for the advancement of cost engineering (2020).

Clase de estimado	Nivel de definición del proyecto	Uso final del estimado	Metodologías de estimación	Precisión
V	0% a 2%	Visualización	Factores de capacidad Modelos paramétricos Analogías	min: -20% a -50% max: 30% a 100%
IV	1% a 15%	Estudio de factibilidad	Factorización de equipos Modelos paramétricos	min: -15% a -30% max: 20% a 50%
III	10% a 40%	Autorización de presupuesto	Unidades de costo semidetalladas	min: -10% a -20% max: 10% a 30%
II	30% a 70%	Oferta y control del presupuesto	Unidades de costo detalladas con lista de materiales preliminar	min: -5% a -15% max: 5% a 20%
I	50% a 100%	Chequeo de estimado	Unidades de costo detalladas con lista de materiales	min: -3% a -10% max: 3% a 15%

##### 4.10.2 Selección de estimado de costo.

De acuerdo a los entregables desarrollados en este trabajo respecto a la matriz de definición de proyecto presentada en la tabla 4.30 se dispone de información suficiente para obtener un estimado de costos clase IV.

Tabla 4.30. Tabla comparativa de entregables desarrollados en el proyecto vs clase de estimado de costos. Datos obtenidos de Association for the advancement of cost engineering (2020).

Clase estimado de costo	Estado de documentos desarrollados	Clase V	Clase IV	Clase III	Clase II	Clase I
Nivel de definición del proyecto	1% a 15%	0% a 2%	1% a 15%	10% a 40%	30% a 70%	50% a 100%
Datos generales del proyecto						

Descripción del alcance del proyecto	Preliminar	General	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Capacidad de producción	Preliminar	Asumido	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Localización de la planta	Aproximado	General	Aproximado	Específico	Específico	Específico
Hidrología y suelos	-	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Plan integrado del proyecto	-	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Programa maestro del proyecto	Preliminar	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Estrategia de escalación	Preliminar	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
WBS	Preliminar	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Cuentas del proyecto	Preliminar	-	Preliminar	Definido	Definido	Definido
Estrategia de contratación	Preliminar	Asumido	Asumido	Preliminar	Definido	Definido
<b>Entregables de ingeniería</b>						
Diagrama de bloques de proceso	Completo	Iniciado/ Preliminar	Preliminar/ Completo	Completo	Completo	Completo
Plano de localización general	-	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Diagrama de flujo de proceso	-	-	Preliminar	Completo	Completo	Completo
Diagrama de flujo de servicios	-	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Diagrama de tuberías e instrumentación	-	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Balances de materia y energía	Preliminar	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Lista de equipos de proceso	Preliminar	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Lista de equipos de servicio	Preliminar	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Diagramas unifilares	-	-	Iniciado/ Preliminar	Completo	Completo	Completo
Hojas de datos de equipos	-	-	Iniciado	Preliminar/ Completo	Completo	Completo
Arreglo general de equipos	Iniciado	-	Iniciado	Completo	Completo	Completo
Lista de partes de repuesto	-	-	-	Preliminar	Completo	Completo
Planos mecánicos	-	-	-	Iniciado/ Preliminar	Preliminar/ Completo	Completo
Planos eléctricos	-	-	-	Iniciado/ Preliminar	Preliminar/ Completo	Completo
Planos civiles	-	-	-	Iniciado/ Preliminar	Preliminar/ Completo	Completo

Los componentes y consideraciones utilizadas para desarrollar el estimado de costos clase IV se describen a continuación.

#### 4.10.3 Información técnica disponible.

La información técnica para desarrollar el estimado de costos es obtenida de los balances de materia y energía, prediseño de equipos y simulaciones de proceso presentados en los anexos A, B, C, D y E.

#### 4.10.4 Estimación de costo utilizando herramientas disponibles.

Las herramientas para el desarrollo del estimado de costos son los softwares Aspen Capital Cost, Crystal Ball y hojas de cálculo en Excel. Las consideraciones especiales para la carga de los equipos en Aspen Capital Cost se presentan en el anexo F.

En la tabla 4.31 se resume los elementos cargados en Aspen Capital Cost con información del costo de los equipos y el costo total instalado por equipos obtenido de la simulación.

Tabla 4.31. Costos de equipos y costo de equipos instalados en USD. Elaboración propia.

Área	Equipo	TAG	Elemento simulado en Aspen Capital Cost	Cantidad	Costo equipo(s) [USD]	Costo equipo(s) instalado(s) [USD]
Pretratamiento de sorgazo	Cinta transportadora	M-102/103	Belt conveyor-covered	2	\$ 73,400.00	\$ 150,600.00
Pretratamiento de sorgazo	Tanque de lavado	V-101	Flat bottom storage tank, optional roof	1	\$ 12,600.00	\$ 44,100.00
Pretratamiento de sorgazo	Molino	M-101	Reversible hammermill	1	\$ 52,200.00	\$ 62,800.00
Pretratamiento de sorgazo	Transportador	M-104	Screw conveyor in u-shaped trough	1	\$ 12,700.00	\$ 35,000.00
Pretratamiento de sorgazo	Tanque de pretratamiento	V-102	Flat bottom storage tank, optional roof	1	\$ 803,000.00	\$ 1,344,200.00
Pretratamiento de sorgazo	Transportador	M-105	Screw conveyor in u-shaped trough	1	\$ 67,800.00	\$ 91,600.00
Pretratamiento de sorgazo	Tanque homogenizador	V-103	Flat bottom storage tank, optional roof	1	\$ 278,700.00	\$ 435,400.00
Producción de biogás	Calentador de biomasa	E-201	Double pipe heat exchanger	1	\$ 131,300.00	\$ 242,600.00
Producción de biogás	Biodigestor	V-201	Flat bottom storage tank, optional roof	1	\$ 3,602,000.00	\$ 4,431,400.00
Producción de biogás	Gasómetro	V-202	Plastic storage tank	1	\$ 168,500.00	\$ 300,500.00
Tratamiento de biogás	Enfriador de biogás 1	E-301	Pre-engineered (standart) U-tub exchange	1	\$ 3,000.00	\$ 61,000.00
Tratamiento de biogás	Desulfurador	T-301 A/B	Low pressure gas storage vessel	2	\$ 175,400.00	\$ 291,000.00
Tratamiento de biogás	Empaque desulfurador	-	Packing-rings, saddles, adsorbents	1	\$ 21,200.00	\$ 30,500.00
Tratamiento de biogás	Soplador desulfurador	-	General purpose blower	1	\$ 7,300.00	\$ 17,300.00
Tratamiento de biogás	Quemador	F-301	Derrick-supported flare stack	1	\$ 23,500.00	\$ 95,800.00
Tratamiento de biogás	Compresor de biogás 1	Q-301	Reciprocating compr. Integral gas engine	1	\$ 203,700.00	\$ 253,100.00
Tratamiento de biogás	Enfriador de biogás 2	E-302	Pre-engineered (standart) U-tub exchange	1	\$ 2,100.00	\$ 66,400.00

Tratamiento de biogás	Enfriador de biogás 3	E-303	Pre-engineered (standart) U-tub exchange	1	\$ 2,200.00	\$ 65,100.00
Tratamiento de biogás	Calentador de biogás	E-304	Pre-engineered (standart) U-tub exchange	1	\$ 1,500.00	\$ 64,100.00
Tratamiento de biogás	Adsorbedor	T-302 A/B	Vertical process vessel	2	\$ 45,000.00	\$ 541,600.00
Tratamiento de biogás	Empaque adsorbedor	-	Packing-rings, saddles, adsorbents	1	\$ 830.00	\$ 1,100.00
Tratamiento de biogás	Compresor biogás 2	Q-302	Reciprocating compr. Integral gas engine	1	\$ 203,700.00	\$ 252,600.00
Digestato	Decantador centrífugo	M-401	Solid bowl centrifuge	1	\$ 279,600.00	\$ 365,600.00
Digestato	Triturador	M-406	Overhead accentric jaw crusher	1	\$ 107,500.00	\$ 121,500.00
Digestato	Soplador composta	Q-401	Centrifugal fan	10	\$ 83,000.00	\$ 251,700.00
Digestato	Transportador	M-402 a M-405	Belt conveyor-open	4	\$ 210,000.00	\$ 496,500.00
Digestato	Tanque de aireación	V-401	Flat bottom storage tank, optional roof	1	\$ 153,700.00	\$ 264,200.00
Digestato	Soplador tanque de aireación	Q-402	General purpose blower	1	\$ 12,200.00	\$ 24,000.00
Digestato	Clarificador	V-402	Thickener/clarifier	1	\$ 223,800.00	\$ 561,000.00
Cogeneración	Turbina de gas	K-501	Gas turbine with combustion chamber	1	\$ 903,100.00	\$ 969,200.00
Cogeneración	Turbina de vapor	K-502	Steam turbine driver, non-condensing	1	\$ 50,000.00	\$ 109,300.00
Cogeneración	HRSO	E-501	Packaged boiler unit	1	\$ 127,100.00	\$ 476,200.00
Cogeneración	Bomba de condensados	P-501	Centrifugal single or multi-stage pump	1	\$ 4,700.00	\$ 16,700.00
Cogeneración	Condensador	E-502	Pre-engineered (standart) U-tub exchange	1	\$ 12,900.00	\$ 61,400.00
Cogeneración	Torre de enfriamiento con bombas	T-501/P-502	Cooling tower: complete field assembly	1	\$ 125,500.00	\$ 213,600.00
Refrigeración por absorción	Bomba LiBr	P-601	Centrifugal single or multi-stage pump	1	\$ 4,700.00	\$ 16,700.00
Refrigeración por absorción	Generador	E-601	Fixed tube, float, head. u-tube exchanger	1	\$ 23,200.00	\$ 85,700.00
Refrigeración por absorción	Condensador	E-602	Fixed tube, float, head. u-tube exchanger	1	\$ 23,200.00	\$ 95,700.00
Refrigeración por absorción	Evaporador	E-603	Fixed tube, float, head. u-tube exchanger	1	\$ 24,700.00	\$ 97,800.00
Refrigeración por absorción	Absorbedor	E-604	Fixed tube, float, head. u-tube exchanger	1	\$ 26,700.00	\$ 100,000.00
Refrigeración por absorción	Tanque separador de agua	V-601	Horizontal drum	1	\$ 275,300.00	\$ 621,600.00

#### 4.10.5 Integración costo directo.

El costo directo es calculado con las siguientes consideraciones:

- El costo de la mano de obra de construcción, equipos y materiales se obtiene de la simulación en Aspen Capital Cost.

- b) El costo para fletes de equipos es obtenido como un porcentaje del costo directo total de campo de acuerdo con Van Amsterdam (2018), el porcentaje aplicado es del 7%.
- c) El costo de la renta de maquinaria se obtiene de la simulación en Aspen Capital Cost.
- d) El costo de la ingeniería básica se calcula como un 15% del costo directo total de campo (Van Amsterdam, 2018). A partir del costo obtenido de la ingeniería se procede a obtener el costo promedio de la hora hombre de ingeniería utilizando el dato de horas hombre calculado por Aspen Capital Cost.
- e) El costo de los permisos se calcula como un 12% del costo directo total de campo de acuerdo a lo mencionado por Valle (2018).
- f) El costo de las pruebas y puesta en marcha se obtiene de la simulación en Aspen Capital Cost.

#### 4.10.6 Integración sobrecosto.

El sobrecosto se considera como la suma de los costos indirectos más la utilidad y se calcula de acuerdo a las expresiones presentadas en Navarrete & Cole (2001). La utilidad es obtenida como el 6.5% de la suma del costo directo más los costos indirectos de acuerdo con Rodríguez Suárez (2020), el porcentaje aplicado es el porcentaje reportado en Rojas López & Bohórquez Patiño (2010). Las expresiones utilizadas se presentan a continuación.

$$CI = 0.2 * (CD + CHH_c) \quad (2)$$

Donde:

*CI*: Costo indirecto.

*CD*: Costo directo.

*CHH<sub>c</sub>*: Costo horas hombre de la construcción

$$U = 0.065 * (CD + CI) \quad (3)$$

Donde:

*U*: Utilidad.

$$SC = CI + U \quad (4)$$

Donde:

*SC*: Sobrecosto.

#### 4.10.7 Contingencia.

La contingencia es un monto agregado al costo base estimado para mitigar el impacto en costo debido a riesgos o incertidumbres asociados al proyecto (Ghorbani, 2017), cabe destacar que la contingencia no es utilizada para absorber costo por cambios en el alcance del proyecto (Lawrence, 2007). La contingencia se establece para cada proyecto basándose en el riesgo aceptable del proyecto, el grado de incertidumbre y el nivel deseado de confianza (Ghorbani, 2017). En la figura

4.18 se muestra la dependencia del aumento en el costo por la contingencia respecto al nivel de confianza deseado para el proyecto.

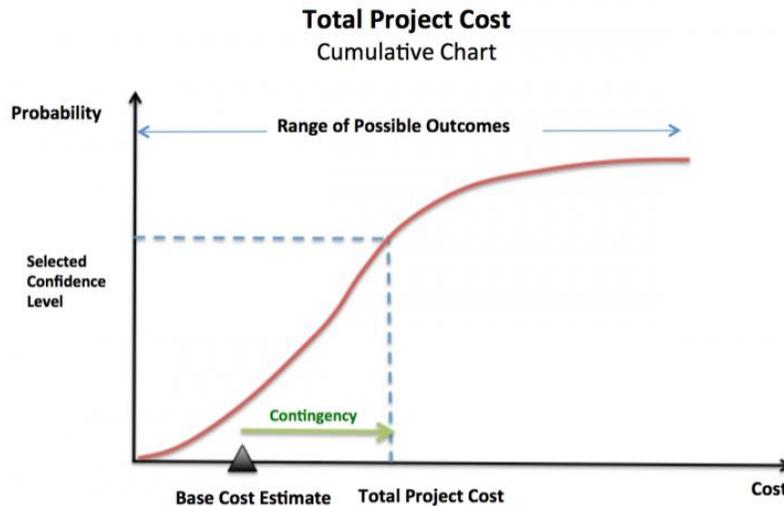


Figura 4.18. Aumento en el costo total del proyecto vs nivel de confianza. Obtenido de Ghorbani, 2017) (2017).

El costo por contingencia se calcula utilizando el método de estimado de rango, el método consiste en asignar rangos posibles de resultados de costos para cada elemento del costo y evaluar la probabilidad de alcanzar el costo total estimado, las principales características de este método son (Ghorbani, 2017):

- Identificar los elementos de costo que tienen un efecto crítico en el resultado del proyecto.
- Cada elemento identificado es evaluado en el rango de mínimo y máximo.
- Utiliza como herramienta matemática la simulación Monte Carlo encargada de variar al azar el costo de los elementos críticos entre el rango máximo y mínimo con el fin de obtener una distribución del costo estimado del proyecto.

La simulación Monte Carlo es realizada con apoyo el programa Crystal ball, el cálculo de la contingencia se lleva a cabo con un nivel de confianza del 90% de acuerdo con Lawrence (2007), el resultado obtenido se presenta en el estimado de costo clase IV en la tabla 4.36 y corresponde a un porcentaje de contingencia del 11.65% respecto a la suma de los conceptos de costo directo total y sobrecosto.

#### 4.10.8 Escalación.

La escalación se refiere al aumento o decremento en el costo de todos los componentes que integran al estimado de costo en un periodo definido de tiempo y que es resultado de las condiciones del mercado (Department of housing and public works , 2008). La ecuación para el cálculo de la escalación se presenta en la ecuación (5).

$$PA = PB * \left(\frac{I_f}{I_i}\right) \quad (5)$$

Donde:

*PA*: Precio actualizado.

*PB*: Precio base.

$I_i$ : Índice inicial.

$I_f$ : Índice final.

Los componentes requeridos para el cálculo del monto por escalación son: El estimado de costo, los índices por escalación y el programa de trabajo. El programa general del proyecto se presenta en la sección 4.8 y es el utilizado para realizar la escalación del proyecto, el estimado de costo es el desarrollado en esta sección y los índices de escalación se pronostican utilizando la información del BLS de los años 2010 a 2019 (BLS, 2020). El pronóstico se realiza para los años 2020 a 2023 utilizando la ecuación de la línea de tendencia obtenida. Los índices de precios del productor (IPP) se presentan en la tabla 4.32, mientras que en las figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 se muestran los gráficos de los datos junto con su línea de tendencia y ecuación.

Tabla 4.32. Datos de IPP's y pronóstico de IPP's utilizados en la escalación de la ingeniería, procura, construcción y puesta en marcha. Elaboración propia.

Etapas	Ingeniería		Procura		Construcción		Puesta en marcha		
	Año	PPI	% Incremento	PPI	% Incremento	PPI	% Incremento	PPI	% Incremento
2010	100.2	100.2	0.00%	246.2	246.2	0.00%	105.6	105.6	0.00%
2011	101.6	101.6	1.40%	248.5	248.5	0.93%	108.7	108.7	2.94%
2012	105.5	105.5	3.84%	257.5	257.5	3.62%	110.2	110.2	1.38%
2013	107.2	107.2	1.61%	263.2	263.2	2.21%	114.7	114.7	4.08%
2014	108.1	108.1	0.84%	266.8	266.8	1.37%	116.9	116.9	1.92%
2015	110.0	110.0	1.76%	266.9	266.9	0.04%	119.5	119.5	2.22%
2016	111.4	111.4	1.27%	266.9	266.9	0.00%	119.5	119.5	0.00%
2017	113.5	113.5	1.89%	265.9	265.9	-0.37%	124.2	124.2	3.93%
2018	115.5	115.5	1.76%	269.0	269.0	1.17%	131.5	131.5	5.88%
2019	116.0	116.0	0.43%	272.3	272.3	1.23%	137.4	137.4	4.49%
2020	118.5	118.5	2.16%	276.8	276.8	1.66%	143.0	143.0	4.08%
2021	120.2	120.2	1.46%	279.4	279.4	0.94%	149.1	149.1	4.27%
2022	122.0	122.0	1.43%	282.0	282.0	0.94%	155.2	155.2	4.09%
2023	123.7	123.7	1.41%	284.7	284.7	0.93%	161.3	161.3	3.93%

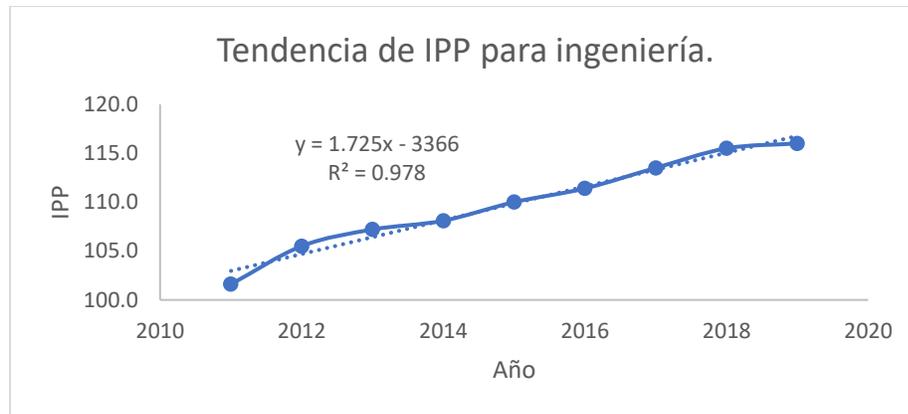


Figura 4.19. IPP vs años para la escalación de la ingeniería. Los datos del BLS corresponden a la industria de servicios de ingeniería. Elaboración propia.

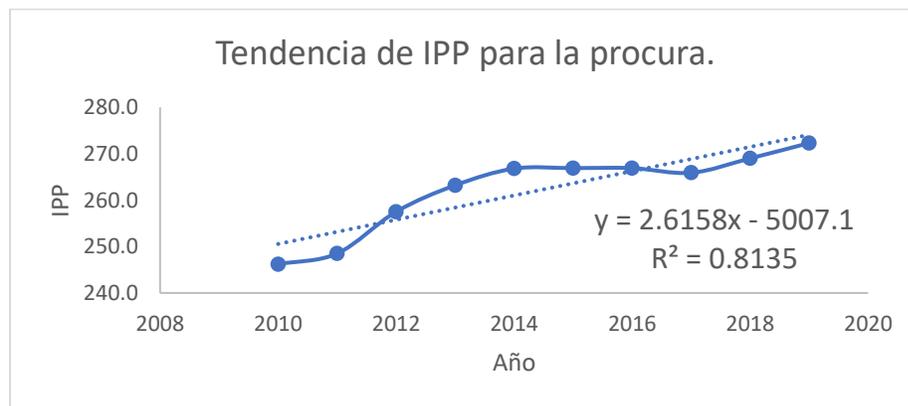


Figura 4.20. IPP vs años para la escalación de la procura. Los datos del BLS corresponden a la industria del equipo y maquinaria para el área de gas y petróleo. Elaboración propia.



Figura 4.21. IPP vs años para la escalación de la construcción. Los datos del BLS corresponden a la industria de la construcción de nuevas instalaciones industriales. Elaboración propia.



Figura 4.22. IPP vs años para la escalación de la puesta en marcha. Los datos del BLS corresponden a la industria de servicios relacionados con la ingeniería y arquitectura. Elaboración propia.

Utilizando los índices pronosticados de la tabla 4.32 y el calendario del proyecto se procede a calcular el monto por escalación del proyecto. En la tabla 4.33 se presenta el resumen de los montos escalados para cada una de las principales actividades del proyecto y en las tablas 4.34 y 4.35 se muestra el detalle de los cálculos.

Tabla 4.33. Montos escalados del proyecto en USD. Elaboración propia.

Actividad	Costo sin escalación	Costo escalado	Costo de escalación
Ingeniería básica	913,621	937,633	24,012
Ingeniería de detalle	2,531,235	2,610,900	79,665
Procura	21,283,274	21,805,119	521,845
Construcción	6,959,168	7,643,642	684,474
Puesta en marcha	1,439,509	1,506,614	67,105
Total	33,126,806	34,503,908	1,377,101

Tabla 4.34. Costo estimado del proyecto sin escalación en USD. Elaboración propia.

Actividad	Costo sin escalación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ingeniería básica	913,621	228,405	228,405	228,405	228,405													
Ingeniería de detalle	2,531,235					843,745	843,745	843,745										
Procura	21,283,274						544,852	1,792,052	4,803,635	6,840,444	5,216,530	1,604,759	481,002					
Construcción	6,959,168								148,230	407,111	1,006,992	1,778,763	1,973,620	1,043,875	478,095	122,481		
Puesta en marcha	1,439,509																959,673	479,836
<b>Total sin escalación</b>	<b>33,126,806</b>	<b>228,405</b>	<b>228,405</b>	<b>228,405</b>	<b>228,405</b>	<b>843,745</b>	<b>1,388,597</b>	<b>2,635,797</b>	<b>4,951,865</b>	<b>7,247,555</b>	<b>6,223,522</b>	<b>3,383,522</b>	<b>2,454,622</b>	<b>1,043,875</b>	<b>478,095</b>	<b>122,481</b>	<b>959,673</b>	<b>479,836</b>

Tabla 4.35. Costo estimado del proyecto con escalación en USD. Elaboración propia.

Actividad	Costo escalado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ingeniería básica	937,633	233,917	234,201	234,485	235,031													
Ingeniería de detalle	2,610,900					869,260	870,300	871,340										
Procura	21,805,119						556,910	1,833,139	4,917,604	7,008,201	5,348,631	1,646,681	493,952					
Construcción	7,643,642								160,861	443,307	1,100,260	1,950,141	2,171,148	1,152,266	529,537	136,123		
Puesta en marcha	1,506,614																1,003,938	502,676
<b>Total escalado</b>	<b>34,503,908</b>	<b>233,917</b>	<b>234,201</b>	<b>234,485</b>	<b>235,031</b>	<b>869,260</b>	<b>1,427,209</b>	<b>2,704,479</b>	<b>5,078,465</b>	<b>7,451,508</b>	<b>6,448,892</b>	<b>3,596,821</b>	<b>2,665,100</b>	<b>1,152,266</b>	<b>529,537</b>	<b>136,123</b>	<b>1,003,938</b>	<b>502,676</b>

## 4.10.9 Estimado de costos clase IV.

El costo final estimado para el proyecto se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$CE = CD + SC + Co + E \quad (6)$$

Donde:

*CE*: Costo estimado.

*CD*: Costo directo.

*SC*: Sobrecosto.

*Co*: Costo de la contingencia.

*E*: Costo de escalación.

En la tabla 4.36 se presenta el estimado de costo clase IV y en la tabla 4.37 se muestra el resumen de los costos con el porcentaje que representa cada concepto respecto al costo total del proyecto.

Tabla 4.36. Estimado de costos clase IV en USD. Elaboración propia.

 <b>Aspen ICARUS</b> <b>Resumen costo del proyecto</b>						
<b>Nombre:</b> Rubén Sánchez Gudiño.						
<b>Título del proyecto:</b> Opciones tecnológicas para el aprovechamiento del sorgazo en el Caribe Mexicano.						
<b>Nombre del proyecto:</b> Composta y biogás con sorgazo y purín porcino.			<b>Nombre del escenario:</b> Proyecto biogás.			
<b>Localización del proyecto:</b> Mérida.		<b>Revisión:</b> Rev 0		<b>Preparado por:</b> RSG.		
<b>Fecha del estimado:</b> feb-21		<b>Clase del estimado:</b> IV		<b>Moneda:</b> USD		
Account	MH	Wage Rate	Labor Cost	Matl Cost	Total Cost	Percentages
(2) Equipos	4,279	33	139,743	9,265,360	9,405,103	59.40% of TDFC
(3) Tuberías	17,787	32	565,471	1,478,478	2,043,949	12.91% of TDFC
(4) Civil	19,409	25	492,328	388,945	881,273	5.57% of TDFC
(5) Estructuras	1,673	29	49,009	183,570	232,579	1.47% of TDFC
(6) Instrumentos	7,205	32	233,914	1,234,917	1,468,831	9.28% of TDFC
(7) Eléctrico	7,044	31	219,694	540,002	759,695	4.80% of TDFC
(8) Aislamiento	17,723	24	429,647	422,180	851,827	5.38% of TDFC
(9) Pintura	5,696	24	138,346	50,990	189,336	1.20% of TDFC
<b>Costo directo total de campo</b>	<b>80,816</b>	<b>231.29</b>	<b>2,268,151</b>	<b>13,564,442</b>	<b>15,832,593</b>	<b>100.00% of TDFC</b>
	(TDMH)		(TDL)	(TDM)	(TDFC)	
<b>Fletes</b>					<b>1,108,281</b>	<b>7.0% of TDFC</b>
<b>Renta de maquinaria (Renta de Equipos, andamios, maquinaria menor y consumibles)</b>					<b>629,600</b>	
<b>Ingeniería básica, detalle y complementaria</b>					<b>2,374,889</b>	<b>37,517 \$ 63</b>
<b>Permisos</b>					<b>1,899,911</b>	<b>12.00% of TDFC</b>
<b>Pruebas y puesta en marcha</b>					<b>992,400</b>	
<b>Costo directo total (TDC)</b>					<b>22,837,674</b>	
<b>Sobrecosto (Indirectos y utilidad)</b>					<b>6,831,990</b>	<b>29.92% of TDC</b>
<b>SUBTOTAL DEL PROYECTO</b>					<b>29,669,664</b>	
<b>Costo de contingencia</b>					<b>3,457,142</b>	<b>11.65%</b>
<b>Costo de escalación</b>					<b>1,377,101</b>	<b>4.16%</b>
<b>Costo total del proyecto</b>					<b>34,503,908</b>	
<b>TOTAL DE PROYECTO</b>					<b>34,503,908</b>	

Tabla 4.37. Resumen de estimado de costos clase IV en USD.

Concepto	Costo [USD]	%
Costo directo total	\$15,832,592.82	45.89%
Fletes	\$ 1,108,281.50	3.21%
Renta de maquinaria	\$ 629,600.00	1.82%
Ingeniería	\$ 2,374,888.92	6.88%
Permisos	\$ 1,899,911.14	5.51%
Pruebas y puesta en marcha	\$ 992,400.00	2.88%
Sobrecosto	\$ 6,831,989.59	19.80%
Contingencia	\$ 3,457,142.49	10.02%
Escalación	\$ 1,377,101.48	3.99%
Total	\$34,503,907.94	100.00%

El costo total estimado del proyecto es de \$34,503,907.94 USD (treinta y cuatro millones quinientos tres mil novecientos siete dólares con noventa y cuatro centavos de dólar). Por ser un estimado de costo clase 4 el costo puede ser menor al monto estimado en un rango del 30% al 15% [\$10,351,172.38 a \$5,175,586.19] o mayor en un rango del 20% al 50% [\$6,900,781.59 a \$17,251,953.97] (Association for the advancement of cost engineering, 2020).

#### 4.11 Evaluación económica del proyecto.

La evaluación del proyecto se desarrolla con la siguiente estructura de flujo de caja (Ross, Westerfield, & Jaffe, 2012):

- (+) Ingresos.
- (-) Costos.
- (=) Utilidad de operación.
- (-) Depreciación.
- (=) Utilidad antes de impuestos.
- (-) Impuestos y participación de los trabajadores en las utilidades.
- (=) Utilidad después de impuesto.
- (+) Depreciación.
- (-) Inversión.
- (+/-) Capital de trabajo.
- (+) Valor de rescate.
- (=) Flujo de efectivo.

Para la evaluación del proyecto se considera un factor de planta de 0.85 (Barragán Escandón, Olmedo Ruiz, Currillo Tigre, & Zalamea León, 2020) y un tipo de cambio de 20.42 (Banxico, 2021).

##### 4.11.1 Costos.

###### 4.11.1.1 Costos de transporte de materias primas.

Para calcular los costos de transporte se utilizan los datos de Arroyo Osorno, Aguerrebere Salido, & Torres Vargas (2008) correspondiente al costo de fletes para empresas dedicadas al transporte de

carga en el 2008; el costo promedio del flete es de 16.69 \$/km utilizando 34 datos reportados; este costo no incluye IVA. Para actualizar el costo al año 2021 se utiliza la calculadora de inflación del Instituto nacional de estadística y geografía (2021), el valor del flete actualizado es de 26.72 \$/km. México truckload (2020) se presenta un costo promedio de flete para el 2021 de 25.83 \$/km sin IVA, este valor no es muy distinto al calculado utilizando los datos de Arroyo Osorno, Aguerrebere Salido, & Torres Vargas (2008). Al valor calculado de 26.72 \$/km se le agrega el 16% de IVA resultado un costo de 30.99 \$/km, este valor será utilizado para estimar el costo de transporte para las materias primas del proyecto.

Para el transporte del sorgazo se considera el uso de camiones con capacidad de 25 t y se toma la distancia promedio entre las dos principales costas donde se recolecta el sorgazo y Dzityá, Yucatán. El recorrido de los camiones entre las costas de Quintana Roo a Dzityá, Yucatán requiere del pago de una caseta cuyo costo es de \$ 1,386 para camiones de acuerdo con SCT (s.f.). En la tabla 4.38 se presentan las consideraciones para el cálculo del costo del transporte de sorgazo.

*Tabla 4.38. Consideraciones estimación de costo transporte de sorgazo, costo en MXN. Datos obtenidos de SCT (s.f.).*

<b>Recorrido camión [km/día]</b>	335.5
<b>Capacidad camión [t]</b>	25
<b>Sorgazo [t/día]</b>	240
<b>Camiones requeridos</b>	10
<b>Costo caseta [MXN]</b>	1,386

Para transportar los purines porcinos de las granjas porcinas a la planta se utilizan pipas de 20 m<sup>3</sup> de capacidad, el recorrido de las pipas se toma como la distancia promedio entre las granjas y la planta presentadas en la tabla 4.2. En la tabla 4.39 se presentan las consideraciones para la estimación del costo asociado al transporte de los purines porcinos.

*Tabla 4.39. Consideraciones estimación de costo transporte de purines porcinos. Elaboración propia.*

<b>Recorrido promedio pipas [km/día]</b>	129.6
<b>Capacidad pipa [m<sup>3</sup>]</b>	20
<b>Purín de cerdo [m<sup>3</sup>/día]</b>	720
<b>Pipas requeridas</b>	36

Los desechos de madera son transportados desde Oaxaca hasta Dzityá, Yucatán, el costo del transporte se divide en tres secciones; el transporte de Oaxaca a Salina Cruz utilizando camiones; el transporte de Salina Cruz a Mérida por medio de las vías férreas; el transporte de Mérida, Yucatán a Dzityá, Yucatán utilizando camiones. Se considera también un costo asociado a la adquisición de los desechos de madera de 1.73 \$/kg (Quiminet, 2016). Los costos de transporte por tren son obtenidos de Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, S.A. de C.V. (2020). Las consideraciones utilizadas para el cálculo del costo se presentan en la tabla 4.40.

Tabla 4.40. Consideraciones estimación de costo transporte desechos de madera, costo en MXN. Datos obtenidos de Quiminet (2016) y Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, S.A. de C.V. (2020).

<b>Requerimiento desecho de madera [kg/día]</b>	40,471.58
<b>Costo desecho de madera [\$/kg]</b>	1.73
<b>Capacidad camiones [t]</b>	25
<b>Camiones requeridos</b>	2
<b>Costo variable flete tren [\$/((t*km))]</b>	0.94
<b>Costo fijo flete tren [\$/t]</b>	5.26
<b>Carga tren [t/semana]</b>	283.30

Las distancias recorridas en cada sección del transporte de los desechos de madera se presentan en la tabla 4.41.

Tabla 4.41. Distancias utilizadas en el transporte de los desechos de madera. Datos obtenidos de Google (2021).

<b>Oaxaca a Salina Cruz [km]</b>	280
<b>Salina Cruz a Mérida [km]</b>	1,400
<b>Mérida a Dzityá [km]</b>	16.4

La estimación del costo asociado al transporte de residuos agrícolas se realiza utilizando las consideraciones presentadas en la tabla 4.42. Los residuos de bagazo de henequén y fibra de coco se encuentran a una distancia promedio de 91.2 km de acuerdo con Eastmond, Herrera, & L. (1999) y Benítez Arellano & Sosa Alcaraz (2017), no se encuentran datos específicos de la localización de los residuos agrícolas y hojas, por lo que se supone una trayectoria de 150 km para estimar sus costos.

Tabla 4.42. Consideraciones estimación de costo transporte residuos agrícolas. Elaboración propia.

<b>Recorrido camiones [km]</b>	150.00
<b>Capacidad camiones [t]</b>	25.00
<b>Hojas recién caídas [t/día]</b>	90.41
<b>Hoja de dzidzilche [t/día]</b>	72.33
<b>Bagazo de henequén [t/día]</b>	9.04
<b>Desecho fibra de coco [t/día]</b>	9.04
<b>Residuos de fruta [t/día]</b>	18.08
<b>Total desechos [t/día]</b>	198.91
<b>Camiones requeridos</b>	8.00

## 4.11.1.2 Costo renta de barcos.

Se propone rentar los barcos sargaceros para la recolección del sargazo, la estimación del costo asociado a los barcos sargaceros considera el costo por el combustible utilizado más el costo de la renta de los barcos. La potencia del barco sargacero se obtiene de Costa Veracruz (2019), el costo de los barcos de Notimex (2019) y el consumo de diésel de (Fondear, 2009). La renta de los barcos se estima suponiendo que el monto de la renta es lo correspondiente al 30% del costo de los barcos anualmente, en la tabla 4.43 se muestran las consideraciones.

Tabla 4.43. Consideraciones estimación de costo renta de barcos sargaceros, costo en MXN. Datos obtenidos de Costa Veracruz (2019), Notimex (2019) y Fondear (2009).

Potencia barco sargacero [hp]	180
Consumo diésel [l/(hp*h)]	0.30
Horas laboradas al día [h]	8
Barcos	3
Costo diésel [\$/l]	19.8
Costo de 3 barcos sargaceros [\$]	22,500,000

## 4.11.1.3 Costo de empaques.

El adsorbedor T-302 y el desulfurador T-301 requieren de empaques para su correcto funcionamiento, el costo de los empaques se obtienen de Aspen Capital Cost. El tiempo de vida útil del empaque es de 6 meses para el adsorbedor T-302 (SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ, 2017) y 2 años para el desulfurador T-301 (Fernández Sé, 2010). En la tabla 4.44 se presentan las consideraciones para la estimación de los costos por empaques.

Tabla 4.44. Consideraciones estimación costo de empaques, costo en MXN. Datos obtenidos de SENER (2017), Fernández Sé (2010) y Aspen Capital Cost.

Costo material empaque adsorbedor [\$]	22,462.00
Costo material empaque desulfurador [\$]	622,810.00
Cambios al año adsorbedor	2
Cambios al año desulfurador	0.5

## 4.11.1.4 Costo del agua.

El costo asociado al servicio de agua se calcula de acuerdo con lo especificado en JAPAY (2018), la tabla 4.45 muestra los datos utilizados para realizar la estimación.

Tabla 4.45. Consideraciones estimación de costo agua, costo en MXN. Elaboración propia con datos obtenidos de JAPAY (2018).

Agua requerida [kg/s]	0.36
Agua requerida [m <sup>3</sup> /h]	1.29

<b>Agua al bimestre [m<sup>3</sup>/bimestre]</b>	1,506.58
<b>Costo agua [\$/m<sup>3</sup>]</b>	13.09

#### 4.11.1.5 Costo gas natural.

Para el costo del gas natural se utiliza el flujo másico requerido por la turbina de gas y el poder calorífico inferior del gas natural reportado en el software Thermoflex. El costo del gas natural se obtiene de CRE (2020). En la tabla 4.46 se presenta las consideraciones para la estimación del costo.

*Tabla 4.46. Consideraciones estimación de costo gas natural, costo en MXN. Elaboración propia con datos obtenidos de CRE (2020) y software Thermoflex.*

<b>Flujo gas natural [kg/h]</b>	164.2
<b>LHV [kJ/kg]</b>	46,286
<b>Precio GN [\$/GJ]</b>	60.37

#### 4.11.1.6 Costo de insumos.

Dentro de los costos de insumos se incluye el costo por el hongo, HCl, floculante y costales de rafia para empacar el producto final. El costo de HCl se obtiene por cotización telefónica con los proveedores Cosmopolitan y Cedrosa, el costo del floculante de Punto H2O (s.f.) y el costo de los costales de rafia de Mercado libre (s.f.). El costo de los costales de rafia ya incluye la impresión de los datos para la composta. Para el hongo utilizado en el área de pretratamiento no se encontraron datos reportados de su costo por lo que se supone un costo para realizar los cálculos. En la tabla 4.47 se muestran los datos utilizados para estimar el costo de los insumos.

*Tabla 4.47. Consideraciones estimación de costo para insumos, costo en MXN. Datos obtenidos de Punto H2O (s.f.), Mercado libre (s.f.) y cotización con proveedores Cosmopolitan y Cedrosa.*

<b>Costo hongo [\$/kg]</b>	2
<b>Costo HCl [\$/l]</b>	60
<b>Costo floculante [\$/l]</b>	75
<b>Costo costal impreso [\$/costal]</b>	4

#### 4.11.1.7 Costos de operación y mantenimiento.

Se conforman del costo de operación y mantenimiento del área de cogeneración obtenido de CENACE (2018) y del costo de operación de los camiones para el proceso de composta, las consideraciones para la estimación de este costo se presentan en la tabla 4.48.

*Tabla 4.48. Consideraciones estimación de costo operación y mantenimiento, costo en MXN. Datos obtenidos de CENACE (2018).*

<b>Costo fijo área cogeneración [\$/ (MW*año)]</b>	204,200.00
<b>Costo variable área cogeneración [\$/MWh]</b>	204.2

<b>Distancia recorrida por camiones para proceso de composta [km/día]</b>	10.00
---	-------

#### 4.11.1.8 Costo de nóminas.

Para tener una estimación del personal que laborará en la planta se toma como referencia la planta de composta de la ciudad de México de Bordo Poniente. La planta de composta de Bordo Poniente genera 118,416 t de composta al año y el personal que labora en la planta asciende a un total de 180 personas (Sánchez Velasco, y otros, 2016). La planta de composta estudiada en este proyecto genera 75,324 t de composta al año y le corresponde, de acuerdo a los datos de la planta de Bordo Poniente, una plantilla de personal de 114 personas. Se consideran tres tipos de sueldos para realizar los cálculos, el sueldo 1 correspondiente a directivos, el sueldo 2 el cual engloba a especialistas como ingenieros, contadores, equipo de ventas entre otros y por último el sueldo 3 conformado por personal obrero. En la tabla 4.49 se presentan las consideraciones para el costo de la nómina.

*Tabla 4.49. Consideraciones estimación de costo de nómina en MXN. Elaboración propia.*

<b>Sueldo 1 [\$ /mes]</b>	60,000.00
<b>Sueldo 2 [\$ /mes]</b>	30,000.00
<b>Sueldo 3 [\$ /mes]</b>	8,000.00
<b>Personas sueldo 1</b>	3
<b>Personas sueldo 2</b>	19
<b>Personas sueldo 3</b>	92

#### 4.11.1.9 Costo de comisión por ventas.

Para incentivar al equipo de ventas se pretende dar una comisión del 0.5% respecto a los ingresos por venta de compost (García Sterling, Vargas Talero, Díaz, Aragón Martínez, & Humberto Sánchez, 2018).

#### 4.11.1.10 Costo publicidad y marketing.

El costo de publicidad y marketing se estima como un porcentaje respecto al total de ingresos de la planta (Moreano, 2016). Los porcentajes aplicados anualmente corresponden a los descritos en la sección 4.1.9.

#### 4.11.1.11 Costo alquiler de oficinas.

Las oficinas se localizan en Dzityá o en Mérida y solo se considera el personal con sueldo 1 y 2 para laborar dentro de las oficinas. De acuerdo con Inmuebles24 (s.f.) la renta de oficinas en MXN es de 25,000 \$/mes.

#### 4.11.1.12 Costo equipos de cómputo e impresoras.

Se considera que el personal con sueldo 1 y 2 contarán con laptop propia, también se considera una impresora multifuncional para oficina. El tiempo de vida de la impresora y de las laptops para un buen funcionamiento se supone de 5 años, después de este tiempo los equipos serán renovados. Durante los cinco años de funcionamiento de los equipos se destinará un porcentaje respecto a su costo para el mantenimiento. En la tabla 4.50 se presentan las consideraciones utilizadas para estimar el costo de los equipos de cómputo e impresoras.

Tabla 4.50. Consideraciones estimación de costo para equipos de cómputo e impresoras, costo en MXN. Elaboración propia.

Laptop [\$]	15,000.00
Impresora [\$]	10,000.00
% Mantenimiento laptop e impresora	15.0%

#### 4.11.1.13 Costo servicios de telefonía e internet, gastos de oficina y gastos de viajes.

Para estimar el costo de los servicios de telefonía e internet se considera contratar dos paquetes de internet de 50Mb y 2 líneas telefónicas con un costo en MXN de 549\$/mes cada uno (Telmex, 2021).

Los costos asociados a los gastos de oficinas y viajes son estimados como un porcentaje respecto al costo de las nóminas del personal con sueldo 1 y 2. El porcentaje es de 1% para la papelería y gastos de oficina y de un 15% para los gastos de viajes.

#### 4.11.1.14 Costo de seguros.

El costo del seguro para plantas de biomasa con generación de energía eléctrica es calculado como un 10% del valor total asegurado por un periodo de 5 años (DL Morris, 2013).

#### 4.11.1.15 Costo transmisión energía eléctrica.

Para el costo de la transmisión de la energía eléctrica se utiliza los valores reportados en SEGOB (2020) y que corresponde en MXN a 106.1 \$/MWh transmitido.

### 4.11.2 Ingresos.

Se consideran como ingresos de la planta la venta del compost, electricidad y CEL obtenidos por la planta debido a que el proceso genera energía limpia y utiliza cogeneración eficiente.

#### 4.11.2.1 Ingresos por composta.

Para calcular el precio de venta del compost se utiliza la siguiente ecuación (Hurtado Araneda, 2011):

$$P = CP + \frac{I * R}{M} \quad (7)$$

Donde:

*P*: Precio de venta por unidad.

*CP*: Costo de producción por unidad.

*I*: Inversión inicial en \$.

*R*: Porcentaje del capital de inversión.

*M*: Producción anual.

El cálculo del costo de producción se obtiene dividiendo el costo anual entre la producción anual de composta, los resultados se presentan en la tabla 4.51.

Tabla 4.51. Costo de producción de la composta en MXN/kg. Elaboración propia.

Descripción	Costo
Costo purines porcinos	-
Costo sargazo	-
Costo desecho de madera	0.6025
Costo residuos de fruta	-
<b>Costo total materias primas</b>	<b>0.6025</b>
Costo transporte sargazo	0.4283
Costo transporte desecho de madera	0.2783
Costo transporte residuos de fruta	0.1532
Costo casetas	0.0571
Costo renta barco sargacero	0.1953
Costo operación camiones para composta	0.0128
<b>Costo total transportes</b>	<b>1.7206</b>
Costo empaques adsorbedor y desulfurador	0.0047
Costo agua	0.0017
Costo hongo	0.1993
Costo HCl	0.0001
Costo floculante	0.0058
Costo costales 50 kg	0.1000
<b>Costo total insumos</b>	<b>0.3116</b>
<b>Costo gastos generales y de administración</b>	<b>1.1363</b>
<b>CP</b>	<b>3.7710</b>

En la tabla 4.52 se muestra los datos utilizados para calcular el precio base de la composta.

Tabla 4.52. Precio base del compost en MXN. Elaboración propia.

Parámetros	Valor
CP [\$/kg]	3.77
I* [\$]	776,719,894.44
R	34.49%
M [kg/año]	75,324,833.26
P [\$/kg]	7.50

\*La inversión no incluye el área de cogeneración.

El precio base calculado es de 7.5 \$/kg para ventas minoristas directamente en la planta. De acuerdo a lo establecido en 4.2.9 se manejan otros dos precios los cuales aplican en función de la cantidad adquirida por los compradores, los precios manejados se presentan en la tabla 4.53 y corresponden al 10% y 25% de descuento respecto al precio base.

Tabla 4.53. Precios de composta manejados por la empresa en función de la cantidad adquirida por los compradores en MXN. Elaboración propia.

Cantidad [t]	R	Descuento	P [\$/kg]
0 a 0.4999	34.5%	0.0%	7.5
0.5 a 4.999	27.6%	10.0%	6.75
>5	17.2%	25.0%	5.625

El precio utilizado en la evaluación económica es un precio ponderado utilizando los tres posibles precios, las ponderaciones son datos supuestos, pero se considera que la gran mayoría de las ventas serán por mayoreo por lo que se les aplicara el costo de 5.625\$/kg mientras que los otros dos precios tienen un menor peso. En la tabla 4.54 se presenta el cálculo del precio utilizado para realizar la evaluación económica.

Tabla 4.54. Precio de composta para evaluación económica en MXN. Elaboración propia.

Ponderación	Precio [\$/kg]	Precio ponderado
80%	5.625	4.50
15%	6.75	1.01
5%	7.5	0.38
Total		5.89

El precio de la composta utilizado para realizar la evaluación económica es de 5.89 \$/kg de composta. Durante el primer año de operación solo se considera la venta de composta correspondiente a 8 meses debido a que el proceso de compostaje tiene una duración de 4 meses, durante los primeros 4 meses de operación solo se cuenta con los ingresos correspondientes a la venta de electricidad y CEL.

#### 4.11.2.2 Ingresos por electricidad y CEL.

El precio para la venta de energía eléctrica por plantas de energía renovable de acuerdo a lo publicado por Sígler (2019) oscila entre los 340 \$/MWh y 1200 \$/MWh. Para obtener el precio de la electricidad se sigue la ecuación (7) aplicada a los datos referentes a la generación de electricidad. Los datos y el precio de la electricidad utilizados para realizar la evaluación económica se presentan en la tabla 4.55.

Tabla 4.55. Precio electricidad para evaluación económica en MXN. Elaboración propia.

Parámetro	Valor
Electricidad anual (M) [MWh/año]	6,803.78
Costo gas natural [\$/MWh]	502.12
Costo O&M [\$/MWh]	372.68
Costo transmisión [\$/MWh]	106.10
CP electricidad [\$/MWh]	980.90
I* [\$]	37,703,488.00
R	3.95%
P precio electricidad [\$/MWh]	1,200.00

\*Inversión solo del área de cogeneración.

El valor de R se propone de 3.95% con el fin de permanecer dentro del rango de precio para energías renovables mencionado por Sígler (2019). Para estimar los ingresos por CEL se utiliza un precio de 301.76 \$/MWh (Ordaz, 2019); (Solis, 2019).

#### 4.11.3 Depreciación.

Los porcentajes utilizados para la depreciación anual son de 5% para las construcciones, 25% para los camiones, 10% para los equipos del área de tratamiento de digestato y de 100% para los equipos utilizados para la generación de energía renovable y cogeneración eficiente de acuerdo a lo publicado con Camara de diputados del H. Congreso de la Unión (2019). La deducción del 100% para los equipos de cogeneración es aplicable debido a que se cumple con los criterios de cogeneración eficiente y generación de energía renovable presentados en SEGOB (2016). El detalle de los cálculos para cogeneración eficiente se presenta en el anexo D.

#### 4.11.4 Pago de utilidades (PTU) e impuestos.

La participación de los trabajadores en las utilidades de la empresa (PTU) es una prestación derivada de las ganancias de la empresa. El monto se calcula como un 10% de las utilidades antes de impuestos de la empresa obtenidos en el ejercicio inmediato anterior (Guada, 2020).

El monto obtenido después del pago de las utilidades se le descuenta un 30% correspondiente al pago de impuestos por ISR (SEGOB, s.f.).

#### 4.11.5 Capital de trabajo.

El capital de trabajo es una medida de la capacidad que tiene una empresa para continuar con el normal desarrollo de sus actividades en el corto plazo (Díaz & Camacaro, 2011). Para calcular el capital de trabajo se utiliza el método del periodo de desfase (Díaz & Camacaro, 2011) el cual consiste en dividir el costo de producción de un año entre el número de días del año con el fin de obtener un costo de producción promedio al día, el valor obtenido se multiplica por el ciclo de caja (Díaz & Camacaro, 2011). El ciclo de caja es el periodo de desfase y es el tiempo en días que la empresa considera se tardará en recuperar el dinero de sus ventas para pagar a los proveedores (García Aguilar, Galarza Torres, & Altamirano Salazar, 2017), la ecuación 8 es la expresión para calcular el capital de trabajo.

$$\text{Capital de trabajo} = \text{Costo total del año} * \left( \frac{\text{Ciclo de caja}}{365} \right) \quad (8)$$

De acuerdo con García Aguilar, Galarza Torres, & Altamirano Salazar (2017) el ciclo de caja puede considerarse de 90 días, este valor es utilizado para calcular el capital de trabajo a partir del segundo año de operación en adelante. Para el primer año de operación se agregan 120 días a los 90 días para un total de 210 días; los 120 días agregados durante el primer año corresponden a los 4 meses necesarios para producir la composta. Lo que se reporta en el estado de resultados para la evaluación del proyecto es el cambio en el capital de trabajo entre el año actual y el año anterior.

#### 4.11.6 Inversión.

La inversión inicial del proyecto se integra por el estimado de costos clase IV, el costo del terreno y el costo de los camiones necesarios para el proceso de composta. El costo del estimado clase IV se describe en la sección del 4.10.9, mientras que el costo del terreno y de los camiones necesarios para el proceso de composta se describen a continuación. El costo del terreno se determina utilizando las dimensiones de los equipos de proceso para calcular el área necesaria para su instalación más la superficie requerida por el proceso de composta calculada a partir de la cantidad de residuos orgánicos a tratar. Para calcular la superficie dedicada al proceso de composta se utiliza el dato reportado en Rodríguez & Córdova (2006) el cual indica que el tratamiento de 25 toneladas de composta al día requiere de una superficie de 1 hectárea. De acuerdo con lo reportado en Inmuebles24 (s.f.) el costo en MXN de la hectárea para uso industrial en Dzityá, Yucatán es de 4,000,000.00 \$/ha, utilizando este dato se estima el costo del terreno para la planta. En la tabla 4.56 se presentan los resultados.

Tabla 4.56. Costo del terreno en MXN. Elaboración propia con datos de Rodríguez & Córdova (2006) e Inmuebles24 (s.f.).

Concepto	Valor
Área equipos [m <sup>2</sup> ]	1,976.65
Factor	3.00
Área equipos ajustada [m <sup>2</sup> ]	5,929.96
Total área equipos [m <sup>2</sup> ]	5,929.96
Residuos orgánicos a compostar [kg/s]	5.90
Área para proceso de composta [m <sup>2</sup> ]	203,904.00

Área total [m <sup>2</sup> ]	209,833.96
Área total [ha]	20.98
Costo terreno [€]	83,933,582.31

Para estimar el costo de los camiones utilizados en el proceso de composta se toma como referencia los camiones utilizados en la planta de composta de la ciudad de México de Borde Poniente. Sánchez Velasco (2016) presenta información de la cantidad y tipo de camiones utilizados en la planta de Borde Poniente, tomando en consideración que la planta del proyecto estudiado tiene una capacidad del 63.6% respecto a Borde poniente, entonces se propone una cantidad de camiones menor en un tercio a lo reportado por Sánchez Velasco (2016). En la tabla 4.57 se presenta los montos de la inversión inicial del proyecto incluyendo el estimado de costo clase IV, el costo del terreno y los camiones necesarios para el proceso de composta por tipo y cantidad.

Tabla 4.57. Inversión inicial del proyecto en MXN. Elaboración propia con datos de Sánchez Velasco (2016) e Inmuebles24 (s.f.).

Concepto inversión inicial	Monto
Estimado de costos clase IV	704,569,800.13
Terreno	83,933,582.31
Cargadores frontales (X2)	6,792,000.00
Trommel móviles (X2)	1,200,000.00
Bobcat (mini cargador) (X1)	590,000.00
Góndolas con tractocamión (X2)	6,000,000.00
DG Bulldozer (X1)	7,780,000.00
Tractor agrícola (X1)	758,000.00
Pipas de agua 20 m <sup>3</sup> (X1)	2,400,000.00
Autos (X2)	400,000.00
<b>Inversión total</b>	<b>814,423,382.44</b>

#### 4.11.7 Valor terminal.

El valor terminal es el valor presente de todos los flujos que ocurrirán más allá del último año de proyección explícita (Vélez Pareja & Tham, 2012). Para calcular el valor terminal para la evaluación del proyecto se utiliza el valor de perpetuidad constante cuya ecuación es (Granel, 2020):

$$VP = \frac{P}{i} \quad (9)$$

Donde:

VP: Es el valor presente en el año n.

P: Flujo de efectivo del año n.

i: Tasa de descuento.

#### 4.11.8 Actualización de costos e ingresos del proyecto.

La actualización de los costos del proyecto, así como el precio de venta de la composta y la electricidad a través de los años proyectados se hace por medio del INPC reportado por INEGI (2019). A partir de los datos de INPC reportados del 2000 al 2019 se hacen las proyecciones de INPC para los años dentro del horizonte temporal de análisis. Utilizando las líneas de tendencia se procede a calcular las inflaciones correspondientes. Los índices utilizados para actualizar los precios y costos son: Índice general de inflación, subíndices de servicios y subíndice agropecuario. En la tabla 4.58 se presenta la tabla resumen de los índices aplicados a cada concepto.

Tabla 4.58. Índices aplicados en la evaluación económica. Elaboración propia.

Concepto	Índice general	Índice de servicios	índices agropecuarios
Electricidad		X	
Composta			X
Transporte y casetas		X	
Materias primas	X		
Renta barco sorgacero		X	
Empaques adsorbedor y desulfurador	X		
Agua		X	
Gas natural		X	
Hongo	X		
HCl	X		
Floculante	X		
Costales	X		
Operación camiones para composta		X	
O&M área cogeneración		X	
Transmisión energía eléctrica		X	
Nómina	X		
Alquiler oficinas		X	
Equipos de computación e impresora.	X		
Servicios de telefonía e internet		X	
Gastos oficina	X		
Gastos de viajes	X		

El detalle del pronóstico para los índices utilizados se encuentra en el anexo G.

#### 4.11.9 Estimación tasa de oportunidad.

La tasa de oportunidad sirve para cuantificar la oportunidad que el dinero tiene de crecer. Para que un inversionista acepte recibir una suma de dinero dentro de un periodo de tiempo, en lugar de recibirla ahora, es preciso entregarle al final de tal periodo una suma superior a la actual, la cantidad adicional que es necesario reconocerle refleja la capacidad que el dinero tiene de crecer en sus

manos (Infante Villareal, 1993). Para estimar la tasa de oportunidad del proyecto se utiliza el modelo para la valoración de los activos de capital (CAPM). El modelo CAPM relaciona de forma lineal el rendimiento esperado con el coeficiente beta, donde beta mide la sensibilidad de la rentabilidad de una acción a los movimientos del mercado (Lenin Támara, Chica Arrieta, & Montiel Ensuncho, 2017). La ecuación para el cálculo de la tasa de oportunidad mediante el modelo de CAPM ajustada por el riesgo país es (Almenara Juste, s.f.):

$$R = R_F + \beta(R_M - R_F) + R_P \quad (10)$$

Donde:

$R$ : Tasa de oportunidad.

$R_F$ : Tasa libre de riesgo.

$R_M$ : Rendimiento del mercado.

$R_P$ : Riesgo país.

$\beta$ : Beta del activo financiero.

Para calcular la tasa libre de riesgo  $R_F$  se utiliza el promedio del rendimiento real de los CETES y para el rendimiento del mercado  $R_M$  se usa el promedio del rendimiento real de los índices de precios y cotizaciones (IPC) del mercado de la bolsa mexicana de valores. Los rendimientos reales se obtienen al descontar la inflación de los CETES corrientes y del IPC mediante la siguiente ecuación (Nacional financiera, 2004):

$$I_R = \left[ \frac{1+I_N}{1+Inf} \right] - 1 \quad (11)$$

Donde:

$I_R$ : Tasa de interés real.

$I_N$ : Tasa de interés nominal.

$Inf$ : Inflación.

Los resultados obtenidos que se utilizan en el modelo de CAPM se muestran en la tabla 4.59.

Tabla 4.59. Cálculo de la tasa libre de riesgo y rentabilidad esperada del mercado. Datos obtenidos de INEGI (2019) y Banxico (2020); (2020).

Fecha	INPC	Inflación	IPC	Rendimiento IPC	CETES corrientes	CETES reales	Rendimiento real IPC
2000	48.31		5,652.19		17.59%		
2001	50.43	4.40%	6,372.28	12.74%	6.75%	2.25%	7.98%
2002	53.31	5.70%	6,127.09	-3.85%	6.98%	1.21%	-9.03%
2003	55.43	3.98%	8,795.28	43.55%	6.04%	1.98%	38.06%
2004	58.31	5.19%	12,917.88	46.87%	8.61%	3.25%	39.63%
2005	60.25	3.33%	17,802.71	37.81%	8.02%	4.54%	33.37%
2006	62.69	4.05%	26,448.32	48.56%	7.02%	2.85%	42.78%

2007	65.05	3.76%	29,536.83	11.68%	7.44%	3.55%	7.63%
2008	69.30	6.53%	22,380.32	-24.23%	7.97%	1.35%	-28.87%
2009	71.77	3.57%	32,120.47	43.52%	4.51%	0.90%	38.57%
2010	74.93	4.40%	38,550.79	20.02%	4.45%	0.05%	14.96%
2011	77.79	3.82%	37,077.52	-3.82%	4.31%	0.47%	-7.36%
2012	80.57	3.57%	43,705.83	17.88%	3.91%	0.33%	13.82%
2013	83.77	3.97%	42,727.09	-2.24%	3.18%	-0.76%	-5.98%
2014	87.19	4.08%	43,145.66	0.98%	2.74%	-1.29%	-2.98%
2015	89.05	2.13%	42,977.50	-0.39%	3.05%	0.90%	-2.47%
2016	92.04	3.36%	45,642.90	6.20%	5.69%	2.25%	2.75%
2017	98.27	6.77%	49,354.42	8.13%	7.22%	0.42%	1.27%
2018	103.02	4.83%	41,640.27	-15.63%	8.17%	3.19%	-19.52%
2019	105.93	2.83%	43,541.02	4.56%	7.25%	4.30%	1.69%
<b>Promedio</b>						<b>1.67%</b>	<b>8.75%</b>

De acuerdo a lo obtenido en la tabla 4.59, la tasa libre de riesgo ( $R_F$ ) es de 1.67% y el rendimiento del mercado ( $R_M$ ) es de 8.75%. Para el riesgo país se utiliza un porcentaje de 3.57% reportado en SEGOB (2021).

El valor de beta es calculado a partir de las betas reportados en Damodaran (2021) para empresas similares a la estudiada en este trabajo, para poder utilizar las betas reportadas es necesario desapalancar las betas mediante la siguiente ecuación (E. Martínez, S. Ledesma, & O. Russo, 2014):

$$\beta = \frac{\beta_a}{\left[1 + (1-T) \frac{D}{E}\right]} \quad (12)$$

Donde:

$\beta_a$ : Beta apalancada.

$D$ : Deuda.

$E$ : Capital de riesgo.

$T$ : Tasa de impuesto.

Los datos utilizados para estimar beta se presentan en la tabla 4.60 y corresponden a empresas pertenecientes a la industria de las energías renovables y la agricultura.

Tabla 4.60. Datos utilizados en el cálculo de beta desapalancada para empresas dedicadas a la energía renovable y la agricultura. Datos obtenidos de Damodaran (2021).

Sector	$\beta$ sin ajuste	Relación D/E	Deuda	Capital	Tasa de impuesto	$\beta$ desapalancada
Agricultura	0.87	45.05%	31.06%	68.94%	0.30	0.66
Energías renovables	0.98	64.06%	39.05%	60.95%	0.30	0.68

En la tabla 4.61 se presenta el resumen de los datos utilizados para calcular la tasa de oportunidad para empresas en la industria de las energías renovables y agricultura utilizando el modelo para la valoración de los activos de capital (CAPM).

*Tabla 4.61. Estimación de tasa de oportunidad para empresas dedicadas a la energía renovable y agricultura utilizando el método CAPM. Datos obtenidos de INEGI (2019), Banxico (2020) y Damodaran (2021).*

Concepto	Símbolo	Energías renovables	Agricultura
Tasa libre de riesgo	Rf	1.67%	1.67%
Rendimiento del mercado	Rm	8.75%	8.75%
Beta	$\beta$	0.68	0.66
Riesgo país	RP	3.57%	3.57%
<b>Tasa de oportunidad (CAPM)</b>	<b>R</b>	<b>10.03%</b>	<b>9.92%</b>

La tasa de oportunidad utilizada para evaluar el proyecto es el promedio de las tasas de oportunidad para empresas de energías renovables y agricultura mostrados en la tabla 4.61, por lo tanto, el valor de la tasa de oportunidad es de 9.98%.

#### 4.11.10 Indicadores de rentabilidad.

Para evaluar económicamente el proyecto se utilizan los indicadores de rentabilidad descritos a continuación.

##### 4.11.10.1 Valor presente neto.

El VPN se define como el valor de los flujos de efectivo futuros expresado en pesos actuales descontados por una tasa de oportunidad, menos el desembolso de la inversión inicial (Aponte, Muñoz, & Álzate, 2016). La expresión para calcular el valor presente neto es (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017):

$$VPN = -I_0 + \sum \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (13)$$

Donde:

$I_0$ : Inversión inicial.

$F_n$ : Flujo de efectivo.

$i$ : Tasa de oportunidad.

$n$ : Número de periodos.

Los criterios de decisión utilizando el valor presente neto son (Fajardo Vaca, y otros, 2019):

$VPN > 0 \rightarrow$  Aceptar proyecto.

$VPN < 0 \rightarrow$  Rechazar proyecto.

$VPN = 0 \rightarrow$  Es indistinto aceptar o rechazar el proyecto.

#### 4.11.10.2 Tasa interna de recuperación.

La tasa interna de recuperación (TIR) es la tasa de descuento que hace al VPN igual a cero (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017) y es la tasa máxima de descuento que hace al proyecto rentable, cualquier tasa de descuento mayor a la TIR provoca que el VPN sea negativo (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017). La TIR no depende de la tasa de oportunidad del inversionista, sino que corresponde a una tasa característica propia del proyecto, este índice calcula la tasa de interés que producen los dineros que están en el proyecto (Álvarez Sánchez, 2017). La ecuación para calcular la TIR es:

$$\sum \frac{F_n}{(1+TIR)^n} - I_0 = 0 \quad (14)$$

Donde:

*TIR*: Tasa interna de recuperación.

$I_0$ : Inversión inicial.

$F_n$ : Flujo de efectivo.

$n$ : Número de periodos.

El criterio para aceptar o rechazar un proyecto es (Crespo Benito & Vilorio, 2007):

$TIR < i \rightarrow$  Rechazar proyecto.

$TIR > i \rightarrow$  Aceptar proyecto.

#### 4.11.10.3 Relación beneficio costo.

La relación beneficio costo (B/C) consiste en calcular la relación existente entre el valor presente de los beneficios entre el valor presente de la inversión utilizando la tasa de descuento del proyecto (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017). La expresión utilizada para su cálculo es:

$$\text{Relación beneficio costo} = \frac{VPB}{VPC} \quad (15)$$

Donde:

*VPB*: Valor presente de los beneficios.

*VPC*: Valor presente de la inversión.

El criterio de rentabilidad utilizando la relación beneficio costo es la siguiente (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017):

$$\frac{VPB}{VPC} > 1 \rightarrow \text{Aceptar proyecto.}$$

$\frac{VPB}{VPC} = 1 \rightarrow$  Es indiferente hacer o no hacer el proyecto.

$\frac{VPB}{VPC} < 1 \rightarrow$  Rechazar proyecto.

#### 4.11.10.4 Periodo de recuperación descontado.

El periodo de recuperación tiene como objetivo identificar el momento en que el inversionista recupera la inversión realizada al inicio del proyecto (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017) es una medida del tiempo en que la inversión está en riesgo (Aponte, Muñoz, & Álzate, 2016). Existen dos posiciones para evaluar este método, la primera consiste en determinar el periodo de recuperación con los flujos de efectivo nominales del proyecto y la segunda calcula el periodo de recuperación con el valor presente de los flujos de efectivo (Morín Maya & Alvarado Roldán, 2017). Para el proyecto desarrollado en este trabajo se utilizan los flujos de efectivo a valor presente también conocido como periodo de recuperación descontado. El periodo de recuperación es una técnica que se centra en la liquidez del proyecto más que en la rentabilidad, esta técnica se utiliza para decidir entre diversos proyectos alternativos siendo la más atractiva la que tenga un periodo de recuperación menor (Crespo Benito & Viloria, 2007).

## 4.11.11 Evaluación del proyecto.

Se presenta en la tabla 4.62 el estado de resultados para la evaluación del proyecto con los flujos de efectivo pronosticados para la planta considerando un horizonte de proyección de 20 años a partir de su puesta en funcionamiento.

Tabla 4.62. Estado de resultados para la evaluación del proyecto, montos en MXN. Elaboración propia.

Concepto	0 2022	1 2023	2 2024	3 2025	4 2026	5 2027	6 2028	7 2029	8 2030	9 2031	10 2032
Ingresos electricidad	\$ -	\$ 8,164,539.00	\$ 8,377,199.06	\$ 8,589,859.12	\$ 8,802,519.17	\$ 9,015,179.23	\$ 9,227,839.29	\$ 9,440,499.35	\$ 9,653,159.40	\$ 9,865,819.46	\$ 10,078,479.52
Ingresos CEL	\$ -	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58
Ingresos compost	\$ -	\$ 295,649,970.56	\$ 457,599,735.61	\$ 471,724,515.38	\$ 485,849,295.16	\$ 499,974,074.93	\$ 514,098,854.71	\$ 528,223,634.48	\$ 542,348,414.26	\$ 556,473,194.03	\$ 570,597,973.81
<b>Total ingresos</b>	\$ -	\$ 305,898,508.14	\$ 468,060,933.25	\$ 482,398,373.08	\$ 496,735,812.91	\$ 511,073,252.74	\$ 525,410,692.58	\$ 539,748,132.41	\$ 554,085,572.24	\$ 568,423,012.07	\$ 582,760,451.91
Costo O&M	\$ -	\$ 167,313,988.58	\$ 171,195,574.84	\$ 175,077,161.09	\$ 178,958,747.34	\$ 182,840,333.60	\$ 186,721,919.85	\$ 190,603,506.11	\$ 194,485,092.36	\$ 198,366,678.61	\$ 202,248,264.87
Gastos generales y de administración	\$ -	\$ 85,588,119.16	\$ 53,591,034.71	\$ 55,208,079.97	\$ 56,825,125.23	\$ 58,442,170.49	\$ 52,046,699.70	\$ 34,689,022.99	\$ 35,589,200.06	\$ 36,489,377.12	\$ 37,389,554.19
<b>Costos totales</b>	\$ -	\$ 252,902,107.74	\$ 224,786,609.55	\$ 230,285,241.06	\$ 235,783,872.57	\$ 241,282,504.09	\$ 238,768,619.55	\$ 225,292,529.10	\$ 230,074,292.42	\$ 234,856,055.74	\$ 239,637,819.06
<b>Utilidad de operación</b>	\$ -	\$ 52,996,400.40	\$ 243,274,323.70	\$ 252,113,132.02	\$ 260,951,940.34	\$ 269,790,748.66	\$ 286,642,073.02	\$ 314,455,603.31	\$ 324,011,279.82	\$ 333,566,956.34	\$ 343,122,632.85
Depreciación	\$ -	\$ 253,238,887.85	\$ 22,079,130.03	\$ 22,079,130.03	\$ 22,079,130.03	\$ 15,599,130.03	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 15,599,130.03
<b>Utilidad antes de impuestos</b>	\$ -	-\$ 200,242,487.45	\$ 221,195,193.66	\$ 230,034,001.98	\$ 238,872,810.30	\$ 254,191,618.62	\$ 264,406,392.67	\$ 292,219,922.96	\$ 301,775,599.47	\$ 311,331,275.99	\$ 327,523,502.82
PTU	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 22,119,519.37	\$ 23,003,400.20	\$ 23,887,281.03	\$ 25,419,161.86	\$ 26,440,639.27	\$ 29,221,992.30	\$ 30,177,559.95	\$ 31,133,127.60
ISR	\$ -	\$ -	\$ 6,285,811.86	\$ 62,374,344.79	\$ 64,760,823.03	\$ 69,091,301.28	\$ 71,696,169.24	\$ 79,733,785.11	\$ 81,766,082.15	\$ 84,346,114.81	\$ 88,917,112.57
<b>Utilidad despues de impuestos</b>	\$ -	-\$ 200,242,487.45	\$ 214,909,381.80	\$ 145,540,137.83	\$ 151,108,587.07	\$ 161,213,036.32	\$ 167,291,061.57	\$ 186,045,498.58	\$ 190,787,525.02	\$ 196,807,601.23	\$ 207,473,262.65
Depreciación	\$ -	\$ 253,238,887.85	\$ 22,079,130.03	\$ 22,079,130.03	\$ 22,079,130.03	\$ 15,599,130.03	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 22,235,680.35	\$ 15,599,130.03
Inversión	-\$ 814,423,382.44	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 26,546,201.27	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 27,118,410.88
Capital de trabajo	\$ -	-\$ 145,505,322.26	\$ 90,078,487.03	-\$ 1,355,826.95	-\$ 1,355,826.95	-\$ 1,355,826.95	\$ 619,861.94	\$ 3,322,871.62	-\$ 1,179,064.93	-\$ 1,179,064.93	-\$ 1,179,064.93
Valor terminal	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Flujo de efectivo</b>	-\$ 814,423,382.44	-\$ 92,508,921.86	\$ 327,066,998.86	\$ 166,263,440.92	\$ 171,831,890.16	\$ 148,910,138.13	\$ 190,146,603.86	\$ 211,604,050.55	\$ 211,844,140.44	\$ 217,864,216.65	\$ 194,774,916.88
<b>Flujo efectivo descontado</b>	-\$ 814,423,382.44	-\$ 84,118,137.63	\$ 270,426,211.88	\$ 125,001,392.86	\$ 117,470,247.77	\$ 92,566,621.52	\$ 107,479,280.17	\$ 108,759,244.53	\$ 99,006,724.07	\$ 92,584,901.55	\$ 75,265,044.23

Concepto	11 2033	12 2034	13 2035	14 2036	15 2037	16 2038	17 2039	18 2040	19 2041	20 2042	n
Ingresos electricidad	\$ 10,291,139.58	\$ 10,503,799.63	\$ 10,716,459.69	\$ 10,929,119.75	\$ 11,141,779.81	\$ 11,354,439.86	\$ 11,567,099.92	\$ 11,779,759.98	\$ 11,992,420.04	\$ 12,205,080.09	\$ 12,205,080.09
Ingresos CEL	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58	\$ 2,083,998.58
Ingresos compost	\$ 584,722,753.58	\$ 598,847,533.36	\$ 612,972,313.13	\$ 627,097,092.91	\$ 641,221,872.68	\$ 655,346,652.46	\$ 669,471,432.23	\$ 683,596,212.01	\$ 697,720,991.78	\$ 711,845,771.56	\$ 711,845,771.56
<b>Total ingresos</b>	<b>\$ 597,097,891.74</b>	<b>\$ 611,435,331.57</b>	<b>\$ 625,772,771.40</b>	<b>\$ 640,110,211.24</b>	<b>\$ 654,447,651.07</b>	<b>\$ 668,785,090.90</b>	<b>\$ 683,122,530.73</b>	<b>\$ 697,459,970.56</b>	<b>\$ 711,797,410.40</b>	<b>\$ 726,134,850.23</b>	<b>\$ 726,134,850.23</b>
Costo O&M	\$ 206,129,851.12	\$ 210,011,437.38	\$ 213,893,023.63	\$ 217,774,609.88	\$ 221,656,196.14	\$ 225,537,782.39	\$ 229,419,368.65	\$ 233,300,954.90	\$ 237,182,541.16	\$ 241,064,127.41	\$ 241,064,127.41
Gastos generales y de administración	\$ 36,843,849.41	\$ 26,961,351.30	\$ 27,574,782.60	\$ 28,188,213.90	\$ 28,801,645.20	\$ 28,195,750.73	\$ 23,197,416.96	\$ 23,667,476.33	\$ 24,137,535.70	\$ 24,607,595.07	\$ 24,607,595.07
<b>Costos totales</b>	<b>\$ 242,973,700.53</b>	<b>\$ 236,972,788.68</b>	<b>\$ 241,467,806.23</b>	<b>\$ 245,962,823.78</b>	<b>\$ 250,457,841.33</b>	<b>\$ 253,733,533.13</b>	<b>\$ 252,616,785.60</b>	<b>\$ 256,968,431.23</b>	<b>\$ 261,320,076.85</b>	<b>\$ 265,671,722.48</b>	<b>\$ 265,671,722.48</b>
<b>Utilidad de operación</b>	<b>\$ 354,124,191.21</b>	<b>\$ 374,462,542.89</b>	<b>\$ 384,304,965.17</b>	<b>\$ 394,147,387.45</b>	<b>\$ 403,989,809.73</b>	<b>\$ 415,051,557.77</b>	<b>\$ 430,505,745.13</b>	<b>\$ 440,491,539.34</b>	<b>\$ 450,477,333.54</b>	<b>\$ 460,463,127.75</b>	<b>\$ 460,463,127.75</b>
Depreciación	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 10,130,352.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 10,130,352.68	\$ -
<b>Utilidad antes de impuestos</b>	<b>\$ 337,214,235.81</b>	<b>\$ 357,552,587.49</b>	<b>\$ 367,395,009.77</b>	<b>\$ 377,237,432.06</b>	<b>\$ 393,859,457.06</b>	<b>\$ 398,009,684.09</b>	<b>\$ 413,463,871.45</b>	<b>\$ 423,449,665.66</b>	<b>\$ 433,435,459.87</b>	<b>\$ 450,332,775.08</b>	<b>\$ 450,332,775.08</b>
PTU	\$ 32,752,350.28	\$ 33,721,423.58	\$ 35,755,258.75	\$ 36,739,500.98	\$ 37,723,743.21	\$ 39,385,945.71	\$ 39,800,968.41	\$ 41,346,387.15	\$ 42,344,966.57	\$ 43,343,545.99	\$ 43,343,545.99
ISR	\$ 91,338,565.66	\$ 97,149,349.17	\$ 99,491,925.31	\$ 102,149,379.32	\$ 106,840,714.16	\$ 107,587,121.52	\$ 112,098,870.91	\$ 114,630,983.55	\$ 117,327,147.99	\$ 122,096,768.73	\$ 122,096,768.73
<b>Utilidad despues de impuestos</b>	<b>\$ 213,123,319.87</b>	<b>\$ 226,681,814.74</b>	<b>\$ 232,147,825.72</b>	<b>\$ 238,348,551.75</b>	<b>\$ 249,294,999.70</b>	<b>\$ 251,036,616.87</b>	<b>\$ 261,564,032.13</b>	<b>\$ 267,472,294.96</b>	<b>\$ 273,763,345.31</b>	<b>\$ 284,892,460.36</b>	<b>\$ 284,892,460.36</b>
Depreciación	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 16,909,955.40	\$ 10,130,352.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 17,041,873.68	\$ 10,130,352.68	\$ 10,130,352.68
Inversión	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 27,646,084.01	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capital de trabajo	-\$ 822,546.12	\$ 1,479,676.89	-\$ 1,108,360.49	-\$ 1,108,360.49	-\$ 1,108,360.49	-\$ 807,704.83	\$ 275,362.40	-\$ 1,073,008.51	-\$ 1,073,008.51	-\$ 1,073,008.51	-\$ 1,073,008.51
Valor terminal	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2,946,865,208.31	\$ -
<b>Flujo de efectivo</b>	<b>\$ 229,210,729.15</b>	<b>\$ 245,071,447.03</b>	<b>\$ 247,949,420.62</b>	<b>\$ 254,150,146.66</b>	<b>\$ 230,670,907.87</b>	<b>\$ 267,270,785.72</b>	<b>\$ 278,881,268.21</b>	<b>\$ 283,441,160.13</b>	<b>\$ 289,732,210.48</b>	<b>\$ 3,240,815,012.83</b>	<b>\$ 293,949,804.53</b>
<b>Flujo efectivo descontado</b>	<b>\$ 80,538,078.81</b>	<b>\$ 78,300,595.91</b>	<b>\$ 72,034,654.81</b>	<b>\$ 67,138,985.65</b>	<b>\$ 55,409,376.75</b>	<b>\$ 58,377,831.68</b>	<b>\$ 55,388,785.65</b>	<b>\$ 51,188,387.06</b>	<b>\$ 47,578,564.80</b>	<b>\$ 483,921,401.24</b>	

En la tabla 4.63 se presentan los indicadores de rentabilidad del proyecto obtenidos a partir de los flujos de efectivo proyectados de la tabla 4.62.

*Tabla 4.63. Indicadores de rentabilidad del proyecto, VPN en USD. Elaboración propia.*

<b>Tasa de descuento CAPM</b>	9.98%
<b>VPN [\\$]</b>	\$ 60,719,628
<b>TIR</b>	21.21%
<b>Relación B/C</b>	2.52
<b>Tiempo recuperación inversión [años]</b>	7.78

De acuerdo con los resultados obtenidos es conveniente realizar el proyecto ya que se calcula un VPN positivo, una TIR mayor a la tasa de descuento y una relación beneficio costo mayor a la unidad.

#### *4.12 Análisis de sensibilidad.*

El análisis de sensibilidad consiste en cambiar el valor de algunas variables independientes en un modelo económico para observar el impacto en la rentabilidad del proyecto (Rus Arias, s.f.). En las tablas 4.64 a 4.70 se presentan los casos estudiados y en las figuras 4.23 a 4.29 se muestran sus respectivas gráficas.

##### *4.12.1 Variación tasa de oportunidad.*

De acuerdo con la tabla 4.64 el proyecto es rentable a tasas de oportunidad menores al 20%, este resultado concuerda con la TIR del proyecto reportada en la tabla 4.63 de la evaluación económica.

*Tabla 4.64. Variación tasa de oportunidad e indicadores de rentabilidad, VPN en millones de USD. Elaboración propia.*

<b>Tasa de oportunidad</b>	<b>VPN</b>	<b>B/C</b>
4%	261.69	7.56
6%	147.52	4.70
8%	92.35	3.32
10%	60.41	2.51
12%	39.84	2.00
14%	25.63	1.64
16%	15.31	1.38
18%	7.51	1.19
20%	1.43	1.04
22%	-3.42	0.91
24%	-7.37	0.82

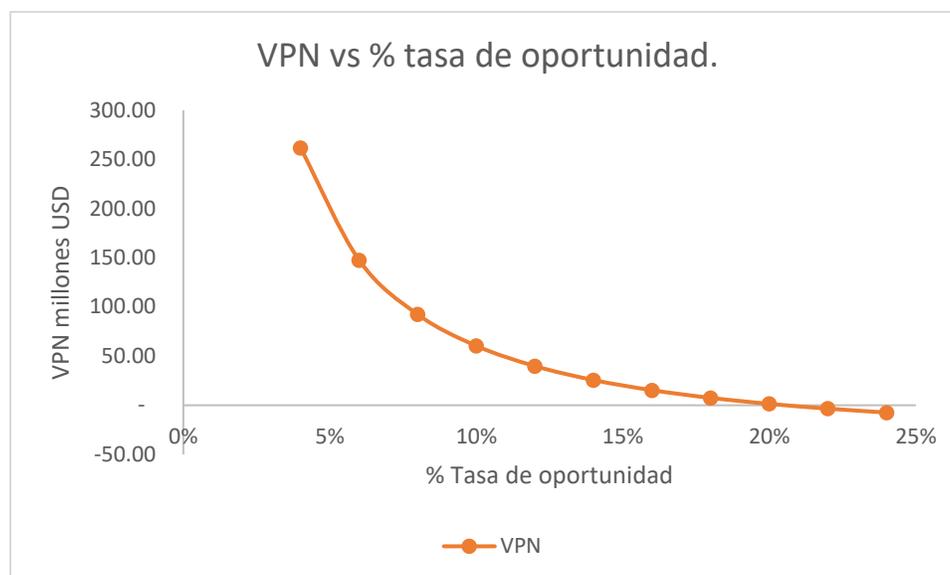


Figura 4.23. Tasa de oportunidad vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.2 Variación inversión inicial.

La inversión inicial del proyecto es de 39.88 millones de USD, este valor puede incrementarse hasta 100 millones de dólares para que el proyecto aún sea rentable lo cual representa un aumento del 250% por lo que esta variable puede considerarse de sensibilidad media. Los resultados para la variación de la inversión inicial del proyecto se presentan en la tabla 4.65.

Tabla 4.65. Variación inversión inicial en millones de USD e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Inversión inicial	VPN	B/C	TIR
35	65.60	2.87	23.33%
40	60.60	2.52	21.17%
45	55.60	2.24	19.40%
50	50.60	2.01	17.93%
55	45.60	1.83	16.67%
60	40.60	1.68	15.58%
65	35.60	1.55	14.62%
70	30.60	1.44	13.76%
75	25.60	1.34	12.99%
80	20.60	1.26	12.29%
85	15.60	1.18	11.66%
90	10.60	1.12	11.07%
95	5.60	1.06	10.53%
100	0.60	1.01	10.03%
105	-4.40	0.96	9.57%

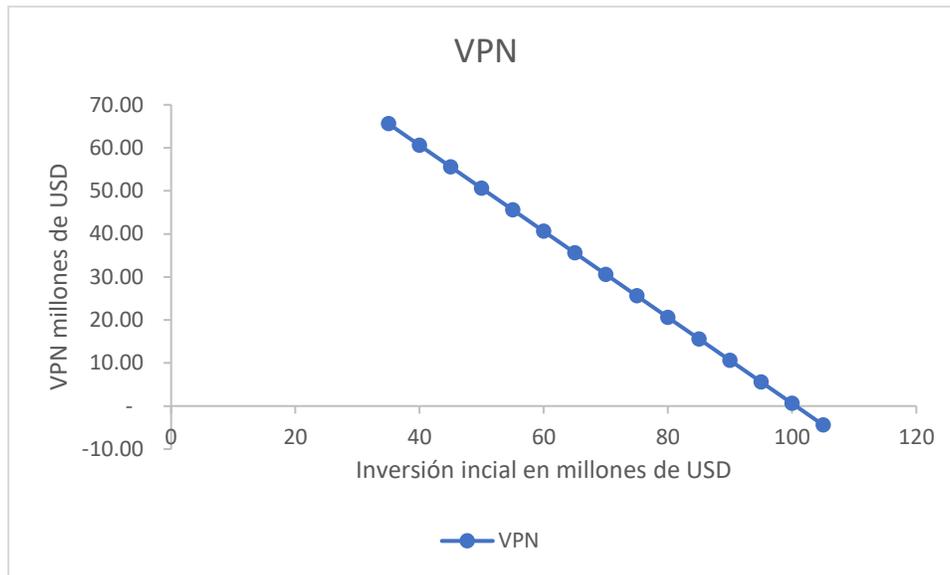


Figura 4.24. Inversión inicial vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.3 Variación precio de composta.

El precio utilizado para realizar el análisis económico es de 5.89 \$/kg y el precio mínimo con el que aún se obtiene un VPN positivo para la comercialización de la composta es de 3.8 \$/kg. De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4.66 el precio de la composta es una variable muy sensible para la evaluación económica existiendo una diferencia de 2.09 \$/kg entre el precio utilizado en la evaluación económica y el precio mínimo que puede utilizarse para que el proyecto aún sea rentable.

Tabla 4.66. Variación precio composta en MXN/kg e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Precio composta	VPN	B/C	TIR
8.5	132.71	4.33	32.81%
8	118.93	3.98	30.62%
7.5	105.15	3.64	28.42%
7	91.37	3.29	26.21%
6.5	77.60	2.95	23.98%
6	63.82	2.60	21.73%
5.5	50.02	2.25	19.41%
5	36.18	1.91	17.00%
4.5	22.32	1.56	14.47%
4	8.37	1.21	11.74%
3.5	-5.75	0.86	8.68%

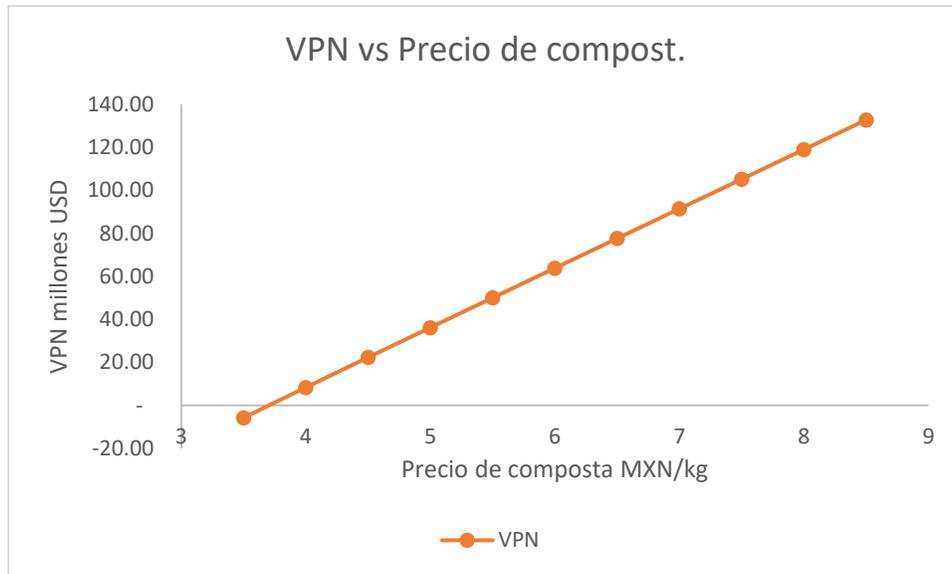


Figura 4.25. Precio de composta vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.4 Variación costo del hongo.

El costo base del hongo en la evaluación económica se supone de 2 \$/kg y de acuerdo con la tabla 4.67 el costo del hongo puede aumentar hasta 20 \$/kg, lo cual representa un aumento del 1,000% respecto al costo base antes de que el proyecto presente un VPN negativo, esto implica que es una variable poco sensible.

Tabla 4.67. Variación costo del hongo en MXN/kg e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Costo hongo	VPN	B/C	TIR
2	60.72	2.52	21.21%
5	51.69	2.30	19.55%
10	36.59	1.92	16.79%
15	21.44	1.54	14.01%
20	6.15	1.15	11.16%
25	-9.44	0.76	8.10%

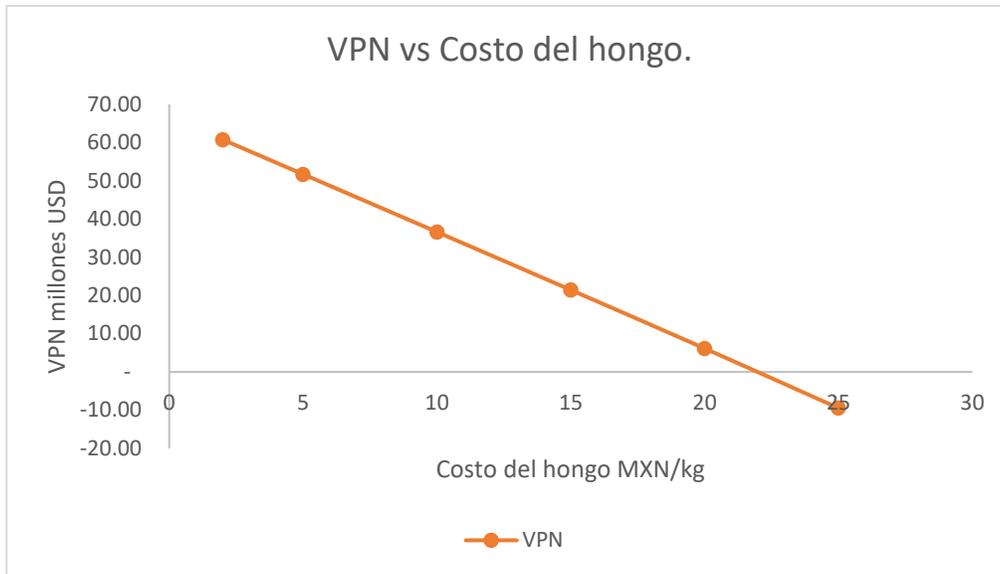


Figura 4.26. Costo del hongo vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.5 Variación costo del flete.

El costo del flete para las materias primas utilizado en la evaluación económica es de 30.99 \$/km. El costo del flete de acuerdo con la tabla 4.68 puede aumentar hasta 80 \$/km antes de presentar un VPN negativo, este valor representa un aumento del 258%, por lo tanto, esta variable tiene una sensibilidad media en la evaluación económica.

Tabla 4.68. Variación costo del flete en MXN/km e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Costo flete	VPN	B/C	TIR
25	67.92	2.70	22.56%
30	61.91	2.55	21.44%
40	49.87	2.25	19.19%
50	37.79	1.95	16.98%
60	25.68	1.64	14.76%
70	13.49	1.34	12.52%
80	1.15	1.03	10.20%
90	-11.43	0.71	7.74%

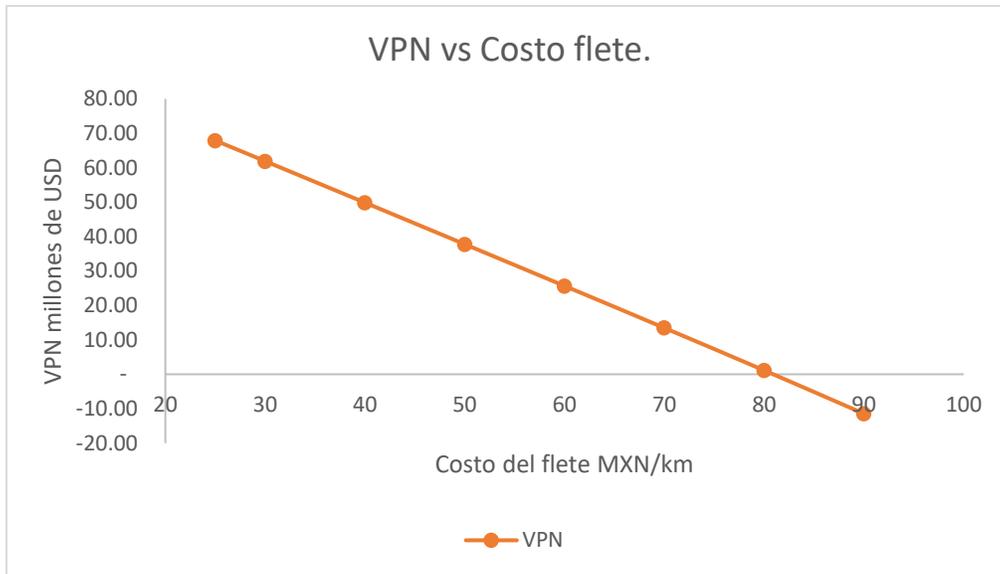


Figura 4.27. Costo del flete vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.6 Variación distancia de recolección para residuos agrícolas y purines porcinos.

La distancia media recorrida por las pipas recolectoras de purines porcinos y los camiones recolectores de residuos agrícolas son de 129.6 km/día y 150 km/día respectivamente. De acuerdo a la tabla 4.69 las distancias medias estimadas para la evaluación económica pueden aumentar hasta un 370% antes de que el proyecto no sea viable económicamente, este aumento se traduce en una distancia de 479 km/día para el caso de las pipas recolectoras de purines porcinos y 555 km/día para el transporte de los residuos agrícolas, por lo tanto, esta variable tiene una sensibilidad media en la evaluación económica.

Tabla 4.69. Variación distancia recorrida para recolectar purines porcinos y residuos agrícolas en términos de porcentaje e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Variación	VPN	B/C	TIR
100.00%	60.72	2.52	21.21%
130.00%	54.10	2.36	19.98%
160.00%	47.46	2.19	18.75%
190.00%	40.81	2.02	17.53%
220.00%	34.17	1.86	16.32%
250.00%	27.51	1.69	15.10%
280.00%	20.81	1.52	13.87%
310.00%	14.10	1.35	12.63%
340.00%	7.35	1.18	11.37%
370.00%	0.54	1.01	10.08%
400.00%	-6.35	0.84	8.74%

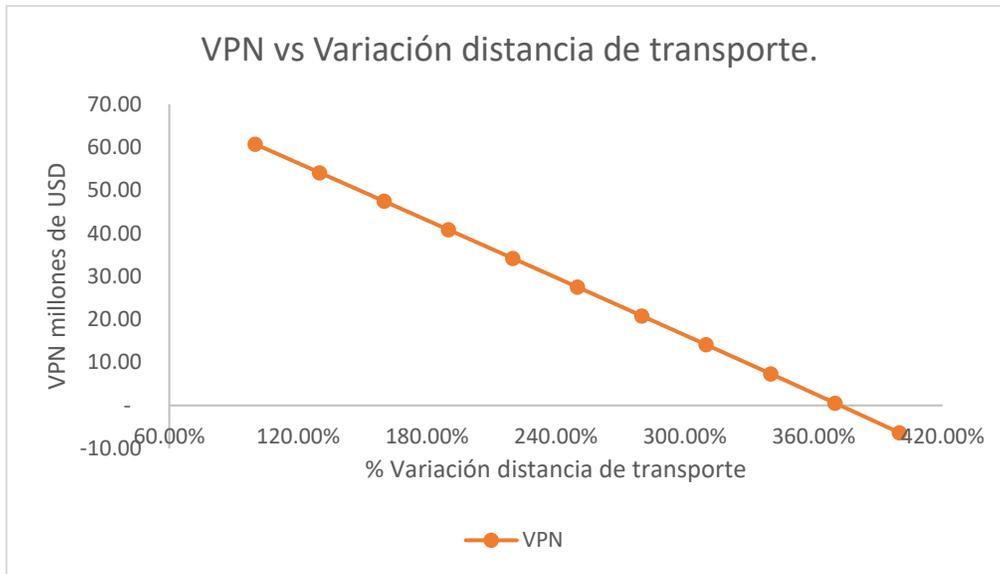


Figura 4.28. Variación distancia recorrida para recolectar purines porcinos y residuos agrícolas en términos de porcentaje vs VPN. Elaboración propia.

#### 4.12.7 Variación distancia de recolección para sorgazo.

La distancia media recorrida por los camiones que transportan el sorgazo desde las costas de Quintana Roo hasta la planta de composta y biogás es de 335.5 km/día. De acuerdo con lo mostrado en la tabla 4.70 esta distancia puede aumentar un 500% antes de resultar un proyecto con VPN negativa, por lo que la distancia recorrida por los camiones puede llegar a ser de hasta 1,677 km/día, por lo tanto, esta variable tiene una sensibilidad baja en la evaluación económica.

Tabla 4.70. Variación distancia recorrida para recolectar sorgazo en términos de porcentaje e indicadores de rentabilidad (VPN en millones de USD). Elaboración propia.

Variación	VPN	B/C	TIR
100.00%	60.72	2.52	21.21%
200.00%	48.08	2.21	18.86%
300.00%	35.41	1.89	16.54%
400.00%	22.69	1.57	14.21%
500.00%	9.87	1.25	11.84%
600.00%	-3.13	0.92	9.37%

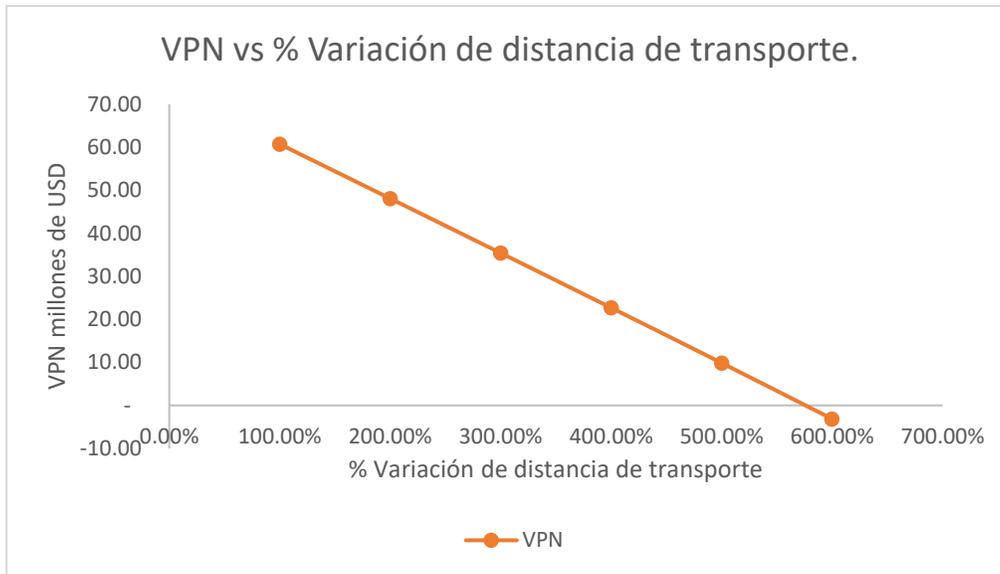


Figura 4.29. Variación distancia recorrida para sorgazo en términos de porcentaje vs VPN.  
Elaboración propia.

La variable más sensible para evaluar la rentabilidad del proyecto es el precio de la composta ya que pequeños cambios en su valor provocan cambios significativos en el VPN del proyecto, por otra parte, las variables que a pesar de tener un mayor rango de variabilidad deben ser controladas para asegurar la rentabilidad del proyecto son el costo de los fletes y las distancias recorridas para el transporte de los purines porcinos, residuos agrícolas y sorgazo.

## 5. Conclusiones y recomendaciones.

### 5.1 Conclusiones.

El sargazo es una macroalga que en los últimos años ha generado problemas en las costas del Caribe mexicano debido a la enorme cantidad de sargazo que llega a las playas. El fenómeno de los arribazones de sargazo más que ser visto como un problema individual e independiente de otras actividades de la región, debe ser abordado con un enfoque global que permita desarrollar el área de oportunidad que tiene México en el campo de las energías limpias y productos biodegradables. México tiene que desarrollar una industria competitiva y limpia aprovechando los diversos residuos orgánicos que el país genera y en particular el sargazo. Utilizar los residuos orgánicos además de generar un valor comercial, permite el desarrollo de las actividades afectadas por el incorrecto tratamiento de estos residuos, lo cual genera a largo plazo una mayor riqueza económica para el país. Debido a las propiedades del sargazo, su periodicidad y los residuos disponibles en la península de Yucatán se concluye que la digestión anaerobia del sargazo es la tecnología con mayor potencial para aprovechar la macroalga.

La producción de biofertilizantes y biogás mediante la codigestión anaeróbica del sargazo y purines porcinos, así como el aprovechamiento del biogás mediante un esquema de cogeneración representan una alternativa real y prometedoras para utilizar los residuos orgánicos propios de la península de Yucatán y al mismo tiempo presentar una solución a los problemas ambientales que afectan esta región. A continuación, se listan los puntos más importantes respecto al uso de estas tecnologías aplicadas al sargazo y purines porcinos:

- El contenido de humedad presente en el sargazo y purines porcinos hacen de las tecnologías bioquímicas de aprovechamiento de biomasa una mejor opción para su aplicación con estas materias primas.
- El alto contenido en carbohidratos y bajo contenido de lignina en el sargazo lo hace una materia prima cercana a lo ideal para el proceso de digestión anaerobia.
- La periodicidad de los arribazones de sargazo y la composición variable del sargazo son los mayores retos para su aprovechamiento.
- Los purines porcinos al ser un residuo constante y en aumento en su generación otorgan una mayor flexibilidad de operación a la planta de digestión anaerobia y tienen la capacidad de cubrir los requerimientos de materia prima en periodos de baja afluencia de sargazo.
- Los costos de transporte para las materias primas tienen un enorme impacto en los costos de operación del proyecto y por lo tanto en la rentabilidad, la cercanía de la planta a las materias primas es un factor clave para el éxito del proyecto.
- Los ingresos obtenidos por la generación de energía a partir del biogás no son suficientes para hacer rentable la planta por lo que es necesario obtener otro producto con capacidad de comercialización como es el biofertilizante.
- El precio de venta para la composta es una variable muy sensible en la rentabilidad del proyecto por lo que se debe tener especial atención en la fluctuación de este concepto, así como en la correcta comercialización del producto.
- La planta tiene una capacidad de producción de composta de 75,324 t/año y una generación eléctrica de 10,947 MWh/año.

- La planta entrega una potencia eléctrica de 1.47 MW de la cual un 37.8% se utiliza como usos propios de la planta, el resto se comercializa en la red eléctrica.
- Para satisfacer las necesidades térmicas del proceso se utiliza como combustible una mezcla compuesta por el biogás generado en un 76.9% y gas natural en 23.1%.
- La planta propuesta cumple con el criterio para considerarse como cogeneración eficiente.
- El estimado de costos desarrollado en este trabajo es de clase IV y la inversión total estimada de la planta es de \$39.88 millones de USD.
- La evaluación económica se desarrolla con un tipo de cambio de \$20.42 MXN y una tasa de descuento de 9.98%.
- La evaluación económica indica que el proyecto es rentable con un VPN de \$60.7 millones de USD, una TIR mayor a la tasa de descuento del proyecto e igual a 21.21%, una relación beneficio costo de 2.52 y un periodo de recuperación descontado de la inversión de 7.8 años.

## 5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

Dentro de las recomendaciones para enriquecer este trabajo se sugiere el desarrollo de las siguientes actividades en trabajos futuros.

- Realizar un análisis de logística para optimizar las rutas de transporte de las materias primas.
- Los datos utilizados para el desarrollo del trabajo son los reportados en la literatura y estimaciones realizadas a partir de los balances de materia y energía. Para el caso de la composta no se tiene el dato exacto de la calidad del producto generado. Se recomienda realizar estudios experimentales y determinar la composición físico-química exacta del biogás y composta generada utilizando el sargazo y los purines porcinos generados en la península de Yucatán.
- Se recomienda la construcción de una planta piloto para obtener información más precisa del proceso antes de proponer el proyecto a escala industrial.
- Para mejorar la rentabilidad de la planta se recomienda el uso de una mayor diversidad de materias primas y la obtención de diferentes productos de valor agregado bajo el concepto de biorrefinería.

## 6. Anexo A. Balances de materia.

### 6.1 Balances de materia áreas: Pretratamiento de sargazo, producción de biogás y tratamiento de digestato.

En esta sección se presentan los balances de materia para las áreas; pretratamiento de sargazo en la tabla A.1; producción de biogás en la tabla A.2; tratamiento de digestato en la tabla A.3. La numeración de las corrientes corresponde a los EFP's descritos en la sección 4.5.

Tabla A.1. Balances de materia área pretratamiento de sargazo. Elaboración propia.

Propiedad	1	2	3	4	5
Fracción vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00
Presión [kPa]	101.00	101.00	150.00	150.00	101.00
Flujo másico [kg/s]	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78
Fracción masa $X_{SARGAZO}$	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
Fracción masa $X_{AGUA}$	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
Fracción masa $X_{PURÍN}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{HCl}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{HONGO}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{DESECHOS DE MADERA}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propiedad	6	7	8	9	10
Fracción vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	26.00	26.00	26.00	26.00	35.00
Presión [kPa]	101.00	101.00	101.00	101.00	101.00
Flujo másico [kg/s]	2.78	0.28	0.00	2.78	5.83
Fracción masa $X_{SARGAZO}$	1.00	0.00	0.00	0.00	0.48
Fracción masa $X_{AGUA}$	0.00	0.00	0.00	1.00	0.48
Fracción masa $X_{PURÍN}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{HCl}$	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{HONGO}$	0.00	1.00	0.00	0.00	0.05
Fracción masa $X_{DESECHOS DE MADERA}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propiedad	11	12	13	14	15
Fracción vapor	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	145.00	103.00	35.00	26.00	26.00
Presión [kPa]	115.00	110.00	101.00	101.00	101.00
Flujo másico [kg/s]	0.08	0.08	5.83	0.47	8.33
Fracción masa $X_{SARGAZO}$	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00
Fracción masa $X_{AGUA}$	1.00	1.00	0.48	0.00	0.00
Fracción masa $X_{PURÍN}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Fracción masa $X_{HCl}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{HONGO}$	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00

Fracción masa $X_{\text{DESECHOS DE MADERA}}$	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
---	------	------	------	------	------

Tabla A.2. Balances de materia área producción de biogás. Elaboración propia.

Propiedad	16	17	18	19	20
Fracción vapor	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Temperatura [°C]	29.00	55.00	145.00	102.00	145.00
Presión [kPa]	101.00	101.00	115.00	110.00	115.00
Flujo másico [kg/s]	14.64	14.64	0.58	0.58	0.12
Fracción masa $X_{\text{SARGAZO}}$	0.19	0.19	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{AGUA}}$	0.19	0.19	1.00	1.00	1.00
Fracción masa $X_{\text{PURÍN}}$	0.57	0.57	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{HCl}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{HONGO}}$	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{DESECHOS DE MADERA}}$	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{DIGESTATO}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{CH}_4}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{CO}_2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{H}_2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{O}_2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{N}_2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{H}_2\text{O}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{H}_2\text{S}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propiedad	21	22	23	24	
Fracción vapor	0.00	1.00	1.00	0.00	
Temperatura [°C]	101.00	55.00	55.00	55.00	
Presión [kPa]	105.00	108.00	102.00	108.00	
Flujo másico [kg/s]	0.12	0.16	0.16	14.48	
Fracción masa $X_{\text{SARGAZO}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{AGUA}}$	1.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{PURÍN}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{HCl}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{HONGO}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{DESECHOS DE MADERA}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{DIGESTATO}}$	0.00	0.00	0.00	1.00	
Fracción masa $X_{\text{CH}_4}$	0.00	0.40	0.40	0.00	
Fracción masa $X_{\text{CO}_2}$	0.00	0.43	0.43	0.00	
Fracción masa $X_{\text{H}_2}$	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fracción masa $X_{\text{O}_2}$	0.00	0.01	0.01	0.00	
Fracción masa $X_{\text{N}_2}$	0.00	0.03	0.03	0.00	
Fracción masa $X_{\text{H}_2\text{O}}$	0.00	0.12	0.12	0.00	
Fracción masa $X_{\text{H}_2\text{S}}$	0.00	0.01	0.01	0.00	

Tabla A.3. Balances de materia área tratamiento de digestato. Elaboración propia.

Propiedad	25	26	27	28	29
Fracción vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	40.00	40.00	35.91	-	-
Presión [kPa]	-	-	-	-	-
Flujo másico [kg/s]	3.60	10.88	11.60	7.74	3.86
Fracción masa $X_{\text{Lodos}}$	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00
Fracción masa $X_{\text{Sólidos}}$	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Agua}}$	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Purga}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Deechos}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Compuestos Degradados}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Composta}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propiedad	30	31	32	33	34
Fracción vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	-	-	26.00	26.00	26.00
Presión [kPa]	-	-	101.00	101.00	101.00
Flujo másico [kg/s]	3.14	0.72	2.30	2.30	5.90
Fracción masa $X_{\text{Lodos}}$	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Sólidos}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Agua}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Purga}}$	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Deechos}}$	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Compuestos Degradados}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción masa $X_{\text{Composta}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Propiedad	35	36			
Fracción vapor	-	0.00			
Temperatura [°C]	-	26.00			
Presión [kPa]	-	101.00			
Flujo másico [kg/s]	3.09	2.81			
Fracción masa $X_{\text{Lodos}}$	0.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Sólidos}}$	0.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Agua}}$	0.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Purga}}$	0.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Deechos}}$	0.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Compuestos Degradados}}$	1.00	0.00			
Fracción masa $X_{\text{Composta}}$	0.00	1.00			

## 6.2 Balances de materia y simulación áreas: Tratamiento de biogás y cogeneración.

El área de tratamiento de biogás y el área de cogeneración se modela utilizando el software Aspen Hysys. El modelado del área de tratamiento de biogás se realiza de acuerdo a la descripción del proceso sección 4.5.5 y se utiliza la ecuación de estado SRK-Twu, mientras que el modelado del área de cogeneración se realiza de acuerdo a la descripción del proceso sección 4.5.6 y se utiliza la ecuación de estado Peng-Robinson. La numeración de las corrientes para todas las áreas descritas en este apéndice corresponde a los EFP's de la sección 4.5. En la figura A.1 se presenta la primera parte de la simulación del área tratamiento de biogás la cual incluye el enfriador E-301, trampa de condensados 1, desulfurador T-301, compresor de biogás Q-301 y enfriador E-302, en la tabla A.4 se muestran los balances de materia correspondientes a la simulación.

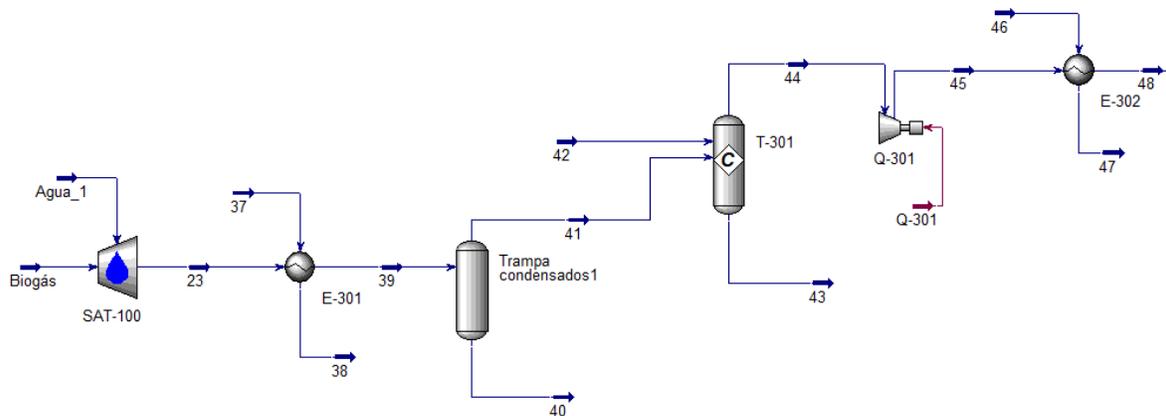


Figura A.1. Simulación área "Tratamiento de biogás" (primera parte). Elaboración propia.

Tabla A.4. Balances de materia simulación área "Tratamiento de biogás" (primera parte). Elaboración propia.

Propiedad	Biogás	Agua_1	23	37	38
Fracción vapor	1.00	0.96	1.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	55.00	100.19	55.00	26.00	30.00
Presión [kPa]	102.00	102.00	102.00	190.00	189.00
Flujo molar [kgmol/h]	21.10	3.89	24.99	415.90	415.90
Flujo másico [kg/h]	503.47	70.06	573.53	7492.49	7492.49
Comp Mole Frac (Methane)	0.68	0.00	0.57	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.26	0.00	0.22	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	0.00	1.00	0.16	1.00	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
Fracción vapor	0.89	0.00	1.00	1.00	0.00
Temperatura [°C]	35.00	35.00	35.00	26.00	34.13
Presión [kPa]	101.90	101.90	101.90	101.90	101.90
Flujo molar [kgmol/h]	24.99	2.65	22.34	0.87	0.29
Flujo másico [kg/h]	573.53	47.67	525.86	25.00	7.06
Comp Mole Frac (Methane)	0.57	0.00	0.64	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.22	0.00	0.25	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.01	0.00	0.01	0.21	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.02	0.00	0.02	0.79	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	0.16	1.00	0.06	0.00	0.54
Comp Mole Frac (H2S)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46
<b>Propiedad</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>
Fracción vapor	1.00	1.00	0.00	0.00	0.97
Temperatura [°C]	34.13	118.86	26.00	30.00	35.00
Presión [kPa]	101.90	302.00	190.00	189.00	301.50
Flujo molar [kgmol/h]	22.98	22.98	345.25	345.25	22.98
Flujo másico [kg/h]	543.80	543.80	6219.66	6219.66	543.80
Comp Mole Frac (Methane)	0.62	0.62	0.00	0.00	0.62
Comp Mole Frac (CO2)	0.24	0.24	0.00	0.00	0.24
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05
Comp Mole Frac (H2O)	0.05	0.05	1.00	1.00	0.05
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La figura A.2 corresponde a la segunda parte de la simulación del área tratamiento de biogás la cual incluye al enfriador E-303, trampa de condensados 2, calentador E-304 y evaporador E-603, la tabla A.5 presenta los balances de materia de esta sección.

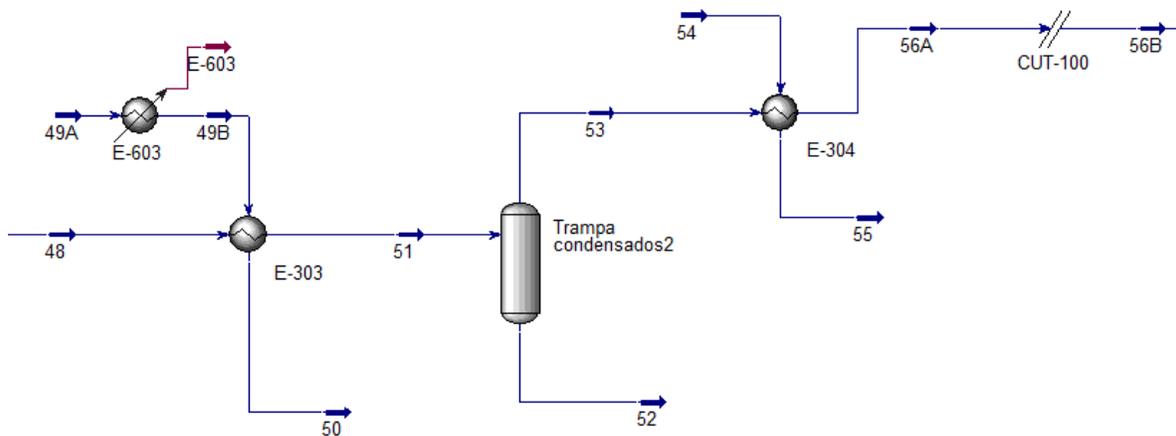


Figura A.2. Simulación área: Tratamiento de biogás (segunda parte). Elaboración propia.

Tabla A.5. Balances de materia simulación área "Tratamiento de biogás" (segunda parte).  
Elaboración propia.

Propiedad	49A	49B	50	51	52
Fracción vapor	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00
Temperatura [°C]	26.00	3.00	4.72	6.00	6.00
Presión [kPa]	189.00	119.00	188.00	301.00	301.00
Flujo molar [kgmol/h]	305.30	305.30	305.30	22.98	1.15
Flujo másico [kg/h]	5500.00	5500.00	5500.00	543.80	20.70
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	1.00	1.00	1.00	0.05	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56A</b>	<b>56B</b>
Fracción vapor	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
Temperatura [°C]	6.00	144.90	103.29	15.00	15.00
Presión [kPa]	301.00	115.00	114.00	300.00	300.00
Flujo molar [kgmol/h]	21.84	0.17	0.17	21.84	21.84
Flujo másico [kg/h]	523.11	3.01	3.01	523.11	523.11
Comp Mole Frac (Methane)	0.66	0.00	0.00	0.66	0.66
Comp Mole Frac (CO2)	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.06	0.00	0.00	0.06	0.06
Comp Mole Frac (H2O)	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

En la figura A.3 se presenta la primera parte de la simulación del área de cogeneración, la simulación incluye el compresor Q-302 y la turbina de gas K-501, en la tabla A.6 se presentan los balances de materia correspondientes a la simulación.

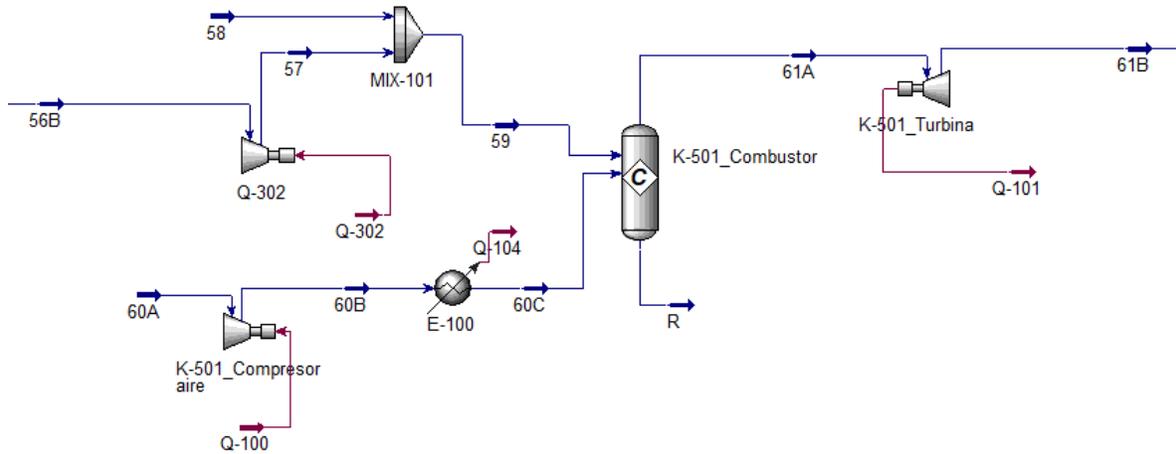


Figura A.3. Simulación área: Cogeneración (primera parte). Elaboración propia.

Tabla A.6. Balances de materia simulación área "Cogeneración" (primera parte). Elaboración propia.

Propiedad	57	58	59	60A	60B
Fracción vapor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Temperatura [°C]	114.08	26.00	87.47	26.00	397.29
Presión [kPa]	1100.00	1100.00	1100.00	100.00	1100.00
Flujo molar [kgmol/h]	21.84	8.99	30.83	794.23	794.23
Flujo másico [kg/h]	523.11	164.22	687.33	22712.00	22712.00
Comp Mole Frac (Methane)	0.66	0.90	0.73	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.25	0.00	0.18	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.02	0.00	0.01	0.21	0.21
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.06	0.00	0.04	0.77	0.77
Comp Mole Frac (H2O)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>60C</b>	<b>R</b>	<b>61A</b>	<b>61B</b>	
Fracción vapor	1.00	0.00	1.00	1.00	
Temperatura [°C]	311.00	994.02	994.02	534.94	
Presión [kPa]	1100.00	1100.00	1100.00	101.00	
Flujo molar [kgmol/h]	794.23	0.00	825.73	825.73	
Flujo másico [kg/h]	22712.00	0.00	23399.25	23399.25	
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.04	0.04	0.04	
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.21	0.14	0.14	0.14	
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.77	0.74	0.74	0.74	
Comp Mole Frac (H2O)	0.02	0.08	0.08	0.08	
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	

La figura A.4 corresponde a la segunda parte de la simulación en el área de cogeneración e incluye en HRSG E-501, bomba P-501, turbina de vapor K-502, condensador E-502 y los equipos con requerimiento de vapor en el proceso correspondientes al biodigestor V-201, intercambiador de calor E-201, calentador de biogás E-304, generador E-601 y tanque de pretratamiento V-102, la tabla A.7 presenta los balances de materia de la segunda sección del área de cogeneración.

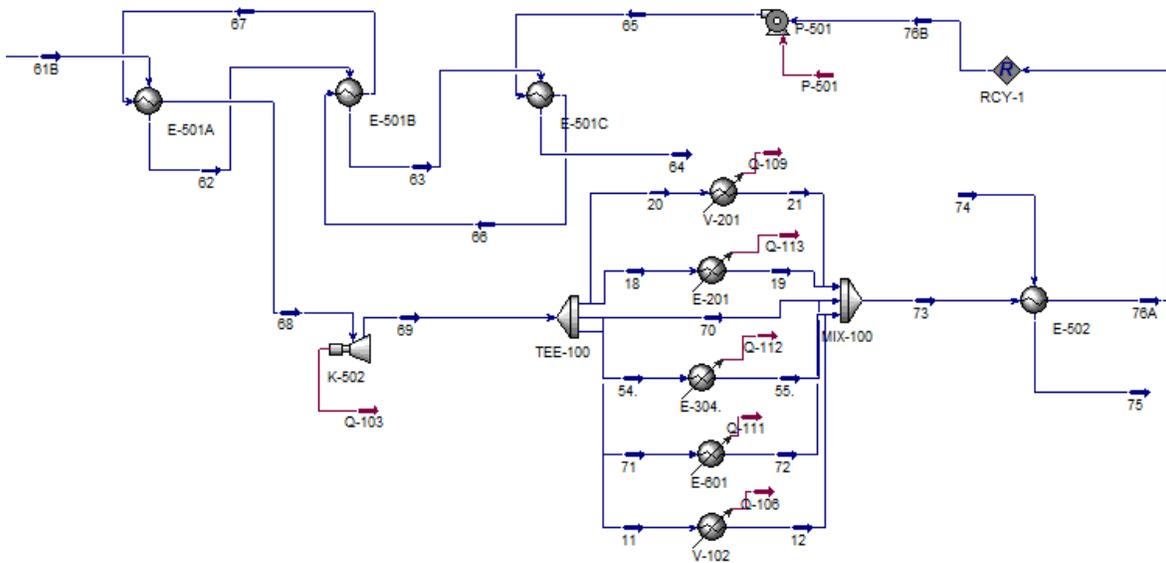


Figura A.4. Simulación área: Cogeneración (segunda parte). Elaboración propia.

Tabla A.7. Balances de materia simulación área “Cogeneración” (segunda parte). Elaboración propia.

Propiedad	62	63	64	65	66
Fracción vapor	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	497.13	209.36	136.38	60.28	173.05
Presión [kPa]	100.80	100.60	100.00	900.00	850.00
Flujo molar [kgmol/h]	825.73	825.73	825.73	205.38	205.38
Flujo másico [kg/h]	23399.25	23399.25	23399.25	3700.00	3700.00
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.74	0.74	0.74	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	0.08	0.08	0.08	1.00	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propiedad	67	68	69	70	71
Fracción vapor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Temperatura [°C]	173.06	310.00	144.90	144.90	144.90
Presión [kPa]	850.00	800.00	115.00	115.00	115.00
Flujo molar [kgmol/h]	205.38	205.38	205.38	28.40	21.98
Flujo másico [kg/h]	3700.00	3700.00	3700.00	511.62	396.00
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>72</b>	<b>73</b>	<b>74</b>	<b>75</b>	<b>76A</b>
Fracción vapor	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	102.78	100.96	26.00	40.00	60.18
Presión [kPa]	112.00	105.00	190.00	189.00	20.00
Flujo molar [kgmol/h]	21.98	205.38	1729.61	1729.61	205.38
Flujo másico [kg/h]	396.00	3700.00	31159.18	31159.18	3700.00
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>76B</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>19</b>

Fracción vapor	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
Temperatura [°C]	60.18	144.90	102.27	144.90	102.27
Presión [kPa]	20.00	115.00	110.00	115.00	110.00
Flujo molar [kgmol/h]	205.38	16.57	16.57	115.30	115.30
Flujo másico [kg/h]	3700.00	298.48	298.48	2077.10	2077.10
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (H2O)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Propiedad</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	
Fracción vapor	1.00	0.00	1.00	0.00	
Temperatura [°C]	144.90	100.96	144.90	103.29	
Presión [kPa]	115.00	105.00	115.00	114.00	
Flujo molar [kgmol/h]	22.97	22.97	0.17	0.17	
Flujo másico [kg/h]	413.79	413.79	3.01	3.01	
Comp Mole Frac (Methane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (CO2)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (H2O)	1.00	1.00	1.00	1.00	
Comp Mole Frac (H2S)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Ethane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Propane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0.00	0.00	0.00	0.00	

### 6.3 Balances de materia y simulación área: Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O.

La simulación del área de refrigeración por absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O se desarrolla en Aspen Plus utilizando la ecuación de estado ELECTNRTL, la simulación se muestra en la figura A.5 e incluye la bomba P-601, generador E-601, tanque V-601, condensador E-602, evaporador E-603 y absorbedor E-604. En la tabla A.8 se presentan los balances de materia de esta área.

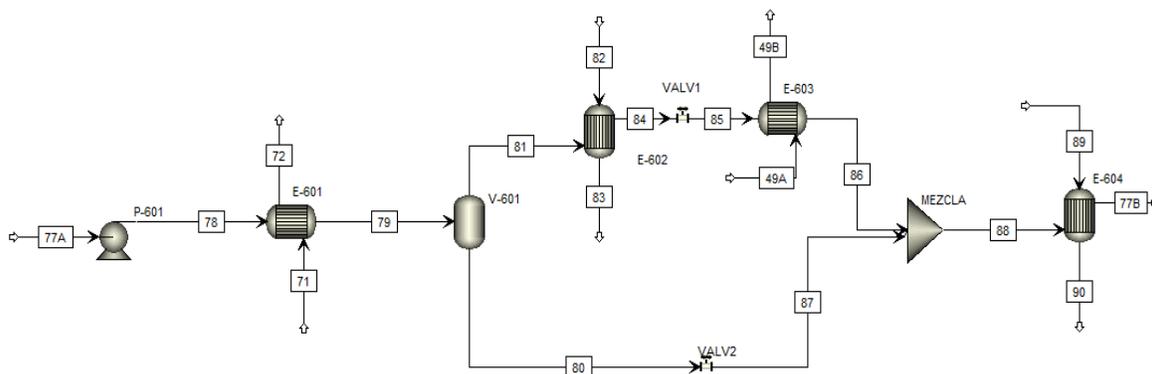


Figura A.5. Simulación área: Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O. Elaboración propia.

Tabla A.8. Balances de materia simulación área “Refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O”.  
Elaboración propia.

Propiedad	77A	78	71	72	79
Fracción vapor	0.00	0.00	1.00	0.04	0.12
Temperatura [°C]	32.70	32.71	145.00	102.83	89.90
Presión [kPa]	0.67	7.46	115.00	112.00	7.46
Flujo molar [kgmol/h]	101.53	101.53	21.98	21.98	101.53
Flujo másico [kg/h]	2754.00	2754.00	396.00	396.00	2754.00
Fracción mol X H <sub>2</sub> O	0.64	0.64	1.00	1.00	0.64
Fracción mol X Li+	0.18	0.18	0.00	0.00	0.18
Fracción mol X BR-	0.18	0.18	0.00	0.00	0.18
Propiedad	81	80	82	83	84
Fracción vapor	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	89.90	89.90	26.00	30.40	40.13
Presión [kPa]	7.46	7.46	120.00	119.00	7.46
Flujo molar [kgmol/h]	12.63	88.90	1718.54	1718.54	12.63
Flujo másico [kg/h]	227.47	2526.53	30960.00	30960.00	227.47
Fracción mol X H <sub>2</sub> O	1.00	0.59	1.00	1.00	1.00
Fracción mol X Li+	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
Fracción mol X BR-	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
Propiedad	85	49A	49B	86	87
Fracción vapor	0.07	0.00	0.00	1.00	0.05
Temperatura [°C]	1.23	26.00	2.97	1.23	46.34
Presión [kPa]	0.67	120.00	119.00	0.67	0.67

Flujo molar [kgmol/h]	12.63	305.74	305.74	12.63	88.90
Flujo másico [kg/h]	227.47	5508.00	5508.00	227.47	2526.53
Fracción mol X H <sub>2</sub> O	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59
Fracción mol X LI+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Fracción mol X BR-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
<b>Propiedad</b>	<b>88</b>	<b>77B</b>	<b>89</b>	<b>90</b>	
Fracción vapor	0.16	0.00	0.00	0.00	
Temperatura [°C]	45.98	32.70	26.00	31.35	
Presión [kPa]	0.67	0.67	120.00	119.00	
Flujo molar [kgmol/h]	101.53	101.53	2148.18	2148.18	
Flujo másico [kg/h]	2754.00	2754.00	38700.00	38700.00	
Fracción mol X H <sub>2</sub> O	0.64	0.64	1.00	1.00	
Fracción mol X LI+	0.18	0.18	0.00	0.00	
Fracción mol X BR-	0.18	0.18	0.00	0.00	

## 7. Anexo B. Selección de turbina de gas.

### 7.1 Metodología de simulación.

La simulación de la turbina de gas se realiza utilizando los datos reportados para la turbina de gas comercial Saturn 20 (2009). La simulación se lleva a cabo en condiciones ISO y en condiciones de sitio utilizando como combustible gas natural, posteriormente se procede a simular la turbina de gas en condiciones de sitio utilizando como combustible la mezcla de biogás y gas natural tal como se muestra en la figura B.1.

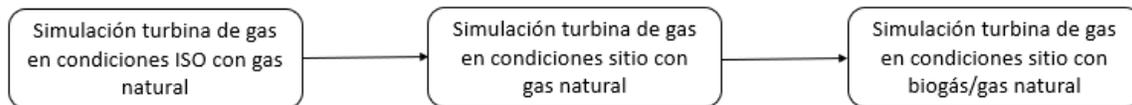


Figura B.1. Metodologías simulación turbina de gas. Elaboración propia.

### 7.2 Simulación de turbina de gas Saturn 20.

La turbina Saturn 20 es seleccionada debido a que el equipo es capaz de suministrar la energía térmica requerida por el proceso con el mínimo de combustible requerido, lo cual se traduce es un mejor aprovechamiento del combustible y una mejor eficiencia de cogeneración. En la tabla B.1 se presenta la comparación de las simulaciones realizadas en aspen hsyst y en las figuras B.2, B.3 y B.4 se muestran el esquema de proceso para las simulaciones a condiciones ISO, sitio con gas natural y sitio con la mezcla biogás/gas natural.

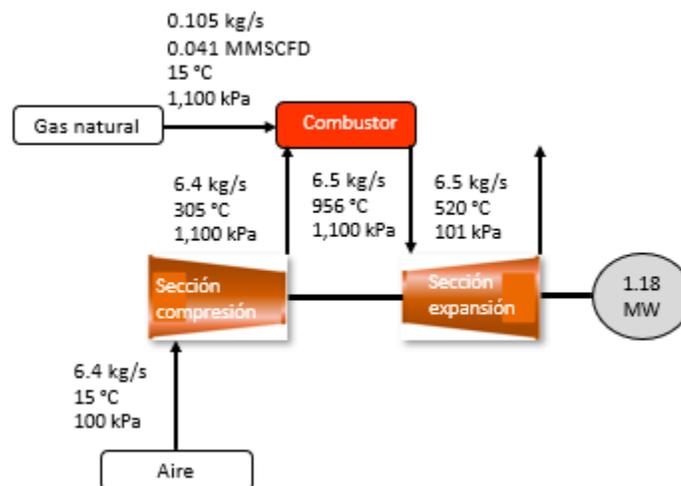


Figura B.2. Esquema de turbina de Saturn 20 en condiciones ISO utilizando gas natural. Elaboración propia.

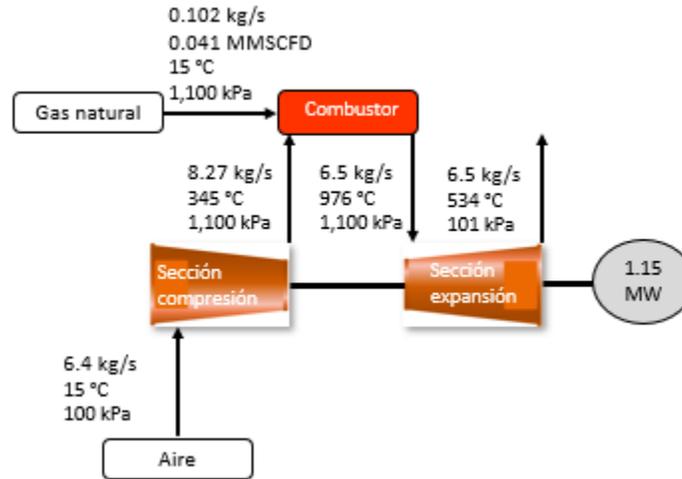


Figura B.3. Esquema de turbina de Saturn 20 en condiciones sitio utilizando gas natural. Elaboración propia.

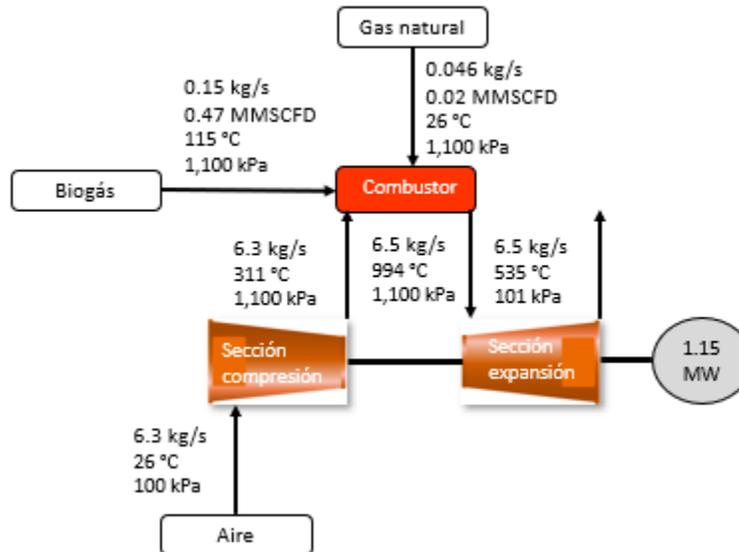


Figura B.4. Esquema de turbina de Saturn 20 en condiciones sitio utilizando biogás y gas natural. Elaboración propia.

Tabla B.1. Parámetros y resultados para las simulaciones de la turbina de gas Saturn 20 en condiciones ISO y sitio. Elaboración propia.

Propiedades	Condiciones ISO Gas natural	Condiciones sitio Gas natural	Condiciones sitio Biogás/Gas natural
LHV Gas natural [kJ/kg]	46,286.00	46,286.00	46,286.00
LHV Biogás [kJ/kg]	0.00	0.00	18,116.00
Flujo másico gas natural [kg/s]	0.105	0.102	0.046
Flujo másico biogás [kg/s]	0.00	0.00	0.15

Heat rate [kJ/kWh]	14,670.00	14,850.00	14,850.00
Eficiencia eléctrica	24.54%	24.24%	24.24%
Relación de compresión	11.00	11.00	11.00
% Humedad relativa	60.00%	71.20%	71.20%
Eficiencia isoentrópica sección compresor	82.40%	82.15%	75.25%
Eficiencia isoentrópica sección turbina	82.80%	82.80%	82.20%
Flujo de aire [kg/s]	6.40	6.40	6.31
Flujo gases exhaustos [kg/s]	6.50	6.50	6.50
Temperatura gases exhaustos [°C]	520.00	534.00	535.00
Temperatura aire entrada [°C]	15.00	26.00	26.00
Potencia sección expansión [kW]	3,405.00	3,505.00	3,642.00
Potencia sección compresión [kW]	2,216.00	2,355.00	2,492.00
Potencia turbina OP16 [kW]	1,189.00	1,150.00	1,150.00

## 8. Anexo C. Gráfica pinch HRSG.

De acuerdo con la simulación presentada en el anexo A y con la información de la descripción del proceso en la sección 4.5.6 se presenta en la figura C.1 la gráfica pinch del equipo HRSG E-501 y en la tabla C.1 se muestran los datos utilizados para graficarla.

Tabla C.1. Entalpía del agua, acercamiento térmico y temperaturas de gases de combustión y del agua. Elaboración propia.

Entalpía agua [kJ/kg]	T agua [°C]	T gases combustión [°C]	Diferencia [°C]
3,078	310	535	-225
2,771	173	497	-324
732	173	209	-36
252	60	136	-76

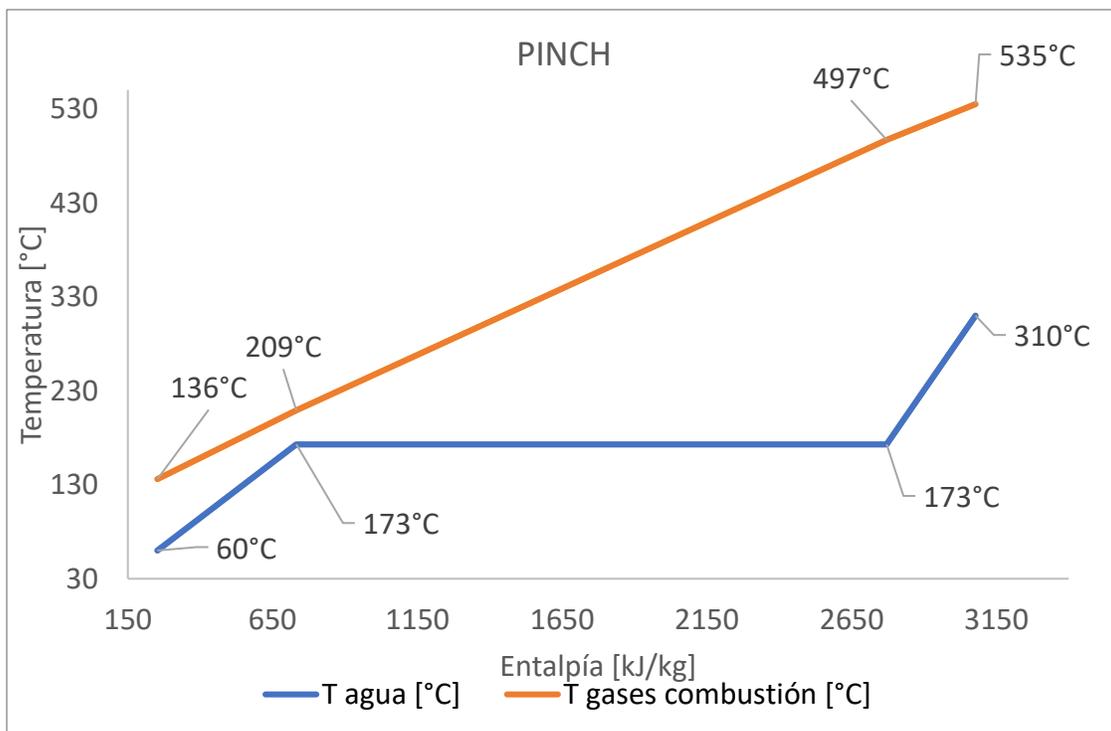


Figura C.1. Gráfica pinch del HRSG. Elaboración propia.

## 9. Anexo D. Eficiencia CHP y cogeneración eficiente.

La eficiencia de cogeneración se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$\eta_{CHP} = \frac{W_E + W_T}{W_C} \quad (16)$$

Donde:

$\eta_{CHP}$ : Eficiencia de cogeneración.

$W_E$ : Potencia eléctrica generada.

$W_T$ : Potencia térmica útil en proceso.

$W_C$ : Potencia suministrada por el combustible.

La potencia suministrada por el combustible se obtiene de la siguiente manera:

$$W_C = (M_b)(LHV_b) + (M_{GN})(LHV_{GN}) \quad (17)$$

Donde:

$M_b$ : Flujo másico del biogás en  $\frac{kg}{s}$ .

$M_{GN}$ : Flujo másico del gas natural en  $\frac{kg}{s}$ .

$LHV_b$ : Poder calorífico inferior del biogás en  $\frac{kJ}{kg}$ .

$LHV_{GN}$ : Poder calorífico inferior del gas natural en  $\frac{kJ}{kg}$ .

La relación calor electricidad se calcula con la siguiente expresión.

$$\alpha = \frac{W_T}{W_E} \quad (18)$$

Donde:

$\alpha$ : Relación calor – electricidad del proceso.

Los resultados para la eficiencia de CHP se presentan en la tabla D.1.

Tabla D.1. Eficiencia de CHP y relación  $\alpha$ . Fuente. Elaboración propia.

LHV biogás [kJ/kg]	18,116.00
Flujo másico biogás [kg/s]	0.15
Energía biogás [kW]	2,632.36
Flujo másico gas natural [kg/s]	0.0456
LHV gas natural [kJ/kg]	46,286.00
Energía gas natural [kW]	2,111.40
Energía eléctrica turbina de gas [kW]	1,150.00

Energía eléctrica turbina de vapor [kW]	320.00
Energía biodigestor [kW]	271.00
Energía calentador biomasa [kW]	1,357.00
Energía calentador de biogás [kW]	2.00
Energía refrigeración [kW]	258.30
Energía tanque pretratamiento [kW]	195.00
Eficiencia CHP	74.90%
Requerimiento térmico del proceso [kW]	2,083.30
Requerimiento eléctrico del proceso [kW]	556.45
Relación calor/electricidad del proceso	3.74

El proceso de cogeneración también puede clasificarse como cogeneración eficiente, los cálculos de cogeneración eficiente se realizan de acuerdo con la metodología de SEGOB (2016) y los resultados se presentan en la tabla D.2; a continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas.

$$RE = \frac{E}{F} \quad (19)$$

$$RH = \frac{H}{F} \quad (20)$$

$$REfE' = REfE * fp \quad (21)$$

$$Fh = \frac{H}{RefH} \quad (22)$$

$$Fe = F - Fh \quad (23)$$

$$EE = \frac{E}{Fe} \quad (24)$$

$$EP = \frac{E}{RefE'} + \frac{H}{RefH} \quad (25)$$

$$AEP = EP - F \quad (26)$$

$$APEP = \frac{EP - F}{EP} \quad (27)$$

$$AREL = \frac{AEP}{Fe} \quad (28)$$

$$ELC = AEP * RefE \quad (29)$$

Donde:

*E*: Energía eléctrica neta generada en la central eléctrica en un periodo de un año MWh.

*H*: Calor útil generado en la central eléctrica y empleado en un proceso productivo en un periodo de un año MWh.

*F*: Energía de los combustibles empleados en un periodo de un año medida sobre el poder calorífico inferior en MWh.

*RE: Eficiencia eléctrica media de una central eléctrica.*

*RH: Eficiencia térmica media de una central eléctrica.*

*REfE: Eficiencia de referencia para la generación eléctrica en una central eficiente con tecnología actual, medida sobre el poder calorífico inferior del combustible.*

*RefH: Eficiencia de referencia para la generación térmica en una central eficiente con tecnología actual, medida sobre el poder calorífico inferior del combustible.*

*REfE': Rendimiento de referencia para la generación eléctrica en una central eficiente de tecnología actual, sobre la base del poder calorífico inferior del combustible, medido a la tensión a la que se interconecta la central eléctrica.*

*fp: Factor de pérdidas de energía eléctrica debidas a la transmisión y distribución desde el nivel de alta tensión hasta el nivel de tensión al que se interconecta la central eléctrica.*

*Fh: Energía de los combustibles utilizados en la central eléctrica atribuible a la producción de calor útil en MWh.*

*Fe: Energía de los combustibles utilizados en la central eléctrica atribuible a la generación de energía eléctrica en MWh.*

*EE: Eficiencia atribuible a la generación eléctrica.*

*EP: Energía primaria obtenida del análisis por separado del comportamiento del proceso de generación de energía eléctrica y del proceso térmico en la central eléctrica en MWh.*

*AEP: Ahorro de energía primaria obtenida del análisis por separado del comportamiento del proceso de generación de energía eléctrica y del proceso térmico de la central eléctrica en MWh.*

*APEP: Ahorro porcentual de energía primaria, obtenida del análisis por separado del comportamiento del proceso de generación de energía eléctrica y del proceso térmico de la central eléctrica.*

*AREL: El aporte relativo de energía limpia de una central eléctrica de cogeneración con relación a la energía generada por la central de referencia.*

*ELC: Energía libre de combustible, es la energía eléctrica generada en la central eléctrica de cogeneración por encima de la que se generaría en una central térmica, utilizando la misma cantidad de combustible que en una central eléctrica de cogeneración en MWh.*

Tabla D.2. Cálculos cogeneración eficiente. Elaboración propia con metodología de SEGOB (2016).

Parámetro	Valor
E [MWh]	10,945.62
F [MWh]	35,949.60
H [MWh]	15,510.02
RE	30.45%
RH	43.14%
RefE	44.00%
RefH	90.00%
FP	91.00%
RefE'	40.04%
Fh [MWh]	17,233.35
Fe [MWh]	18,716.24
EE	58.48%
EP [MWh]	44,570.07
AEP [MWh]	8,620.47
APEP	19.34%
AREL	46.06%
ELC [MWh]	3,793.01

El criterio para calificar como cogeneración eficiente de acuerdo con SEGOB (2016) es:

$$ELC > 0 \quad (30)$$

El valor calculado de ELC es mayor a cero por lo que la planta de cogeneración puede considerarse como cogeneración eficiente.

## 10. Anexo E. Diseño de equipos.

### 10.1 Tanque de lavado V-101.

El sargazo recolectado es lavado con agua, el flujo de agua de lavado está en una relación 1:1 con un tiempo de lavado de 30 segundos de acuerdo con Milledge J. J., Nielsen, Sadek, & Harvey (2018) en la tabla E.1 se presentan los flujos másicos del tanque de lavado V-101.

Tabla E.1. Flujos de entrada y de salida al tanque de lavado V-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico total [kg/s]	Mtotal	5.56
Flujo másico sargazo [kg/s]	Malga	2.78
Flujo másico agua [kg/s]	magua	2.78

La densidad de la mezcla se calcula con la siguiente ecuación el resultado se muestra en la tabla E.2:

$$\frac{m_{mezcla}}{\rho_{mezcla}} = \frac{m_{sargazo}}{\rho_{sargazo}} + \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}} \quad (31)$$

Tabla E.2. Cálculo densidad de la mezcla tanque de lavado V-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Inverso $\rho$ mezcla [ $m^3/kg$ ]	$1/\rho$	6.45E-03
$\rho$ mezcla [ $kg/m^3$ ]	$\rho$	154.96

El flujo volumétrico es obtenido mediante:

$$Q = \frac{M}{\rho} \quad (32)$$

Donde:

$Q$ : Es el flujo volumétrico.

$M$ : Es el flujo másico.

$\rho$ : Es la densidad de la mezcla.

El volumen de diseño se calcula con la expresión indicada en Olaya & Octavio (2009) el resultado se presenta en la tabla E.3.

$$V_d = (Q_m)(T_r) \quad (33)$$

Donde:

$V_d$ : Es el volumen de diseño del tanque de lavado.

$Q_m$ : Es el flujo volumétrico de la mezcla agua – sargazo.

$T_r$ : Es el tiempo de retención.

Tabla E.3. Volumen de diseño del tanque de lavado V-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>m</sub>	129.06
Tiempo de retención [h]	T <sub>r</sub>	0.01
Volumen diseño [m <sup>3</sup> ]	V <sub>d</sub>	1.08

### 10.2 Molino M-101.

Los cálculos se realizarán de acuerdo a lo indicado en Ezurike, Osazuka, Okoronkwo, & Okoji (2018), para proceder con los cálculos se requiere del diámetro del motor y las revoluciones del motor, ambos datos son obtenidos de Couper, Penny, Fair, & Walas (2010). El resultado de los cálculos se presenta en la tabla E.4 y E.5.

Calculo velocidad de la banda.

$$V = \frac{\pi D_1 N_1}{60} \quad (34)$$

Donde:

V: Velocidad de la banda en  $\frac{m}{s}$ .

D<sub>1</sub>: Diámetro de motor en m.

N<sub>1</sub>: Revoluciones del motor en rpm.

Tabla E.4. Velocidad de la banda molino M-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Relación	D1/D2	1.286
Diámetro de motor [m]	D1	0.75
Revoluciones del motor [rpm]	N1	1200.00
Velocidad de la banda [m/s]	V	47.12

Calculo tención centrifuga.

$$T_C = M_C V^2 \quad (35)$$

Donde:

T<sub>C</sub>: Tención centrifuga.

M<sub>C</sub> = Masa de la banda por unidad de longitud.

El cálculo de M<sub>C</sub> es:

$$M_C = L_1 L_2 \rho_{banda} \quad (36)$$

Donde:

L<sub>1</sub>: Ancho de banda.

$L_2$ : Espesor de banda.

$\rho_{banda}$ : Densidad de banda.

Las especificaciones de la banda son obtenidas de Ezurike, Osazuka, Okoronkwo, & Okoji (2018).

Cálculo tensión lado estrecho.

$$T_1 = 3 * T_C \quad (37)$$

Donde:

$T_1$ : Tensión lado estrecho.

Cálculo tensión lado flojo.

$$T_2 = \frac{T_1 - T_C}{e^{\theta\mu}} + T_C \quad (38)$$

Donde:

$T_2$ : Tensión lado flojo.

$\mu$ : Coeficiente de fricción entre la banda y el rotor.

$\theta$ : Ángulo de la banda con el rotor.

Los valores de  $\mu$  y  $\theta$  son obtenidos de Ezurike, Osazuka, Okoronkwo, & Okoji (2018).

Cálculo de la potencia transmitida del motor a la banda.

$$W = (T_1 + T_2) * V \quad (39)$$

Donde:

$W$ : Potencia.

Tabla E.5. Diseño de molino M-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Banda utilizada en el molino	Tipo de banda	banda V
Ancho de banda [m]	L1 banda	0.013
Espesor de banda [m]	L2 banda	0.008
Densidad de banda [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ banda	1,140.000
Masa de la banda por unidad de longitud [kg/m]	Mc	0.119
Tensión centrifuga [N]	Tc	263.282
Tensión del lado estrecho [N]	T1	789.845
Coeficiente de fricción entre la banda y el rotor	$\mu$	0.300
Ángulo	$\theta$	5.480
Tensión del lado flojo [N]	T2	365.017
Potencia [kW]	W	54.422

### Cálculo de número de martillos.

Para saber el número de martillos se recomienda el uso de 1 martillo por cada 2.5 hp (Feedmachinery, 2019). El resultado se presenta en la tabla E.6.

Tabla E.6. Dimensiones y número de martillos molino M-101. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Longitud [cm]	L1 martillo	20.00
Ancho [cm]	L2 martillo	5.00
Espesor [cm]	L3 martillo	0.64
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	V martillo	64.00
Material	Material	acero suave
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ acero	7.85
Masa de martillo [kg]	m martillo	0.50
Número de martillos	Número de martillos	30.00
Masa total martillos [kg]	m total martillo	15.07

### 10.3 Tanque de pretratamiento V-102.

El pH de una disolución en función de la concentración de un ácido fuerte puede expresarse como (Brown, LeMay, Bursten, & Burdge, 2004):

$$pH = -\log [H^+] \quad (40)$$

Conociendo el valor del pH podemos calcular la concentración de H<sup>+</sup>. El cálculo del flujo de HCl se realiza con la expresión de dilución de soluciones (Brown, LeMay, Bursten, & Burdge, 2004).

$$c_1 * q_1 = c_2 * q_2 \quad (41)$$

Donde:

$c_1$ : Concentración inicial solución de HCl.

$q_1$ : Flujo volumétrico de disolución HCl inicial.

$c_2$ : Concentración final de HCl.

$q_2$ : Flujo volumétrico de disolución HCl final.

Tabla E.7. HCl requerido en el tanque de pretratamiento V-102. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
pH solución	pH	5
Concentración [mol/l]	[H <sup>+</sup> ]	0.00001
Concentración [mol/m <sup>3</sup> ]	[H <sup>+</sup> ]	0.01
Concentración HCl para agregar [mol/m <sup>3</sup> ]	[HCl]	11640
Flujo HCl [m <sup>3</sup> /h]	Q HCl	1.80E-05

Tabla E.8. Flujos de entrada al tanque de pretratamiento V-102. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico total [kg/s]	Mtotal	5.83
Flujo másico sargazo [kg/s]	Msargazo	2.78
Flujo másico agua [kg/s]	Magua	2.78
Flujo másico HCl [kg/s]	M HCl	5.91E-06
Flujo másico hongo [kg/s]	M hongo	0.28

El cálculo del volumen se realiza con la ecuación (33) y el resultado se presenta en la tabla E.9.

Tabla E.9. Cálculo volumen tanque de pretratamiento V-102. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Tiempo de retención [h]	Tr	144
Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /h]	Qm	26.25
Volumen de diseño [m <sup>3</sup> ]	V1	3,780.00

El tanque de pretratamiento V-102 se encuentra a 35 °C por lo que debe de suministrarse energía para aumentar y mantener la temperatura de 26 °C a 35 °C. Las pérdidas de calor debido a las superficies del tanque de pretratamiento se calculan con la siguiente expresión:

$$q = U * A * \Delta T \quad (42)$$

Para estimar la superficie del tanque se supone es de forma cilíndrica y se calcula utilizando las dimensiones obtenidas por Aspen Capital Cost. Para realizar los cálculos se utiliza el valor de U de 1.7 W/(m<sup>2</sup>\*K), este valor se encuentra dentro de los valores reportados en Téllez Santana (2008) y Janusz Teleszewski & Zukowski (2018) para biodigestores aislados. El calor requerido para calentar la mezcla se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q = M * Cp * \Delta T \quad (43)$$

Para conocer el Cp de la mezcla utilizamos la siguiente ecuación (Valiente, 2008):

$$Cp_{mezcla} = \sum_{i=1}^n (Cp_i)(x_{wi}) \quad (44)$$

Donde:

$Cp_i$ : Capacidad calorífica de i.

$x_{wi}$ : Fracción masa de i.

Los Cp utilizados para calcular el Cp de la mezcla se muestran en la tabla E.10, para el caso del hongo se supone su Cp es igual al Cp del sargazo.

Tabla E.10. Capacidades caloríficas utilizadas para obtener el Cp de la mezcla en tanque de pretratamiento V-102. Datos obtenidos de Smith, Van Ness, & Abbott (2007), Krunal Acid Agency (2014) y Fernández Rivera (2017).

Concepto	Valor
Cp agua [J/(kg*K)]	4,188.73

Cp HCl [J/(kg*K)]	2,460.00
Cp sargaz y hongo [J/(kg*K)]	1,500.00
Cp de la mezcla [J/(kg*K)]	2,780.35

En la tabla E.11 se presentan los cálculos y el requerimiento de energía térmica para el tanque de pretratamiento V-102.

*Tabla E.11. Cálculos para requerimiento en energético del tanque de pretratamiento V-102. Elaboración propia.*

Concepto	Símbolo	Valor
Temperatura interna tanque [°C]	T2	35.00
Temperatura en suelo [°C]	T1	5.00
Temperatura promedio Yucatán [°C]	T1'	26.00
Temperatura biomasa entrada [°C]	T1''	25.00
Superficie tanque de pretratamiento [m <sup>2</sup> ]	A1	766.05
Superficie piso tanque de pretratamiento [m <sup>2</sup> ]	A2	314.16
Superficie techo biodigestor [m <sup>2</sup> ]	A3	314.16
Perdidas por las paredes [kW]	Q1	11.74
Perdidas por el techo [kW]	Q2	4.82
Perdidas por el suelo [kW]	Q3	16.05
Calor para mantener el tanque a 35°C [kW]	Q4	162.04
Energía total requerida [kW]	Q total	194.66

#### 10.4 Tanque de homogenización V-103.

Es un tanque con agitación cuyo propósito es mezclar y homogenizar las propiedades de la corriente de sargazo, porquinaza, aserrín y hongo antes de ser tratadas en el biodigestor, en la tabla E.12 se presenta el desglose de los flujos másicos de entrada al tanque.

*Tabla E.12. Flujos másicos de entrada al tanque de homogenización V-103. Elaboración propia.*

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico total [kg/s]	Mtotal	14.64
Flujo másico sargazo [kg/s]	Msargazo	2.78
Flujo másico agua [kg/s]	Magua	2.78
Flujo másico HCl [kg/s]	M HCl	5.91E-06
Flujo másico hongo [kg/s]	M hongo	0.28
Flujo másico purín [kg/s]	Mpurín	8.33
Flujo másico aserrín [kg/s]	Maserrín	0.47

El volumen de diseño del tanque se realiza siguiendo la misma metodología utilizada en el tanque de pretratamiento V-102 los resultados se presentan en la tabla E.13.

Tabla E.13. Volúmen de diseño para el tanque homogenizador V-103. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Tiempo de retención [h]	Tr	12.00
Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /h]	Qm	52.69
Volumen [m <sup>3</sup> ]	V1	632.24

Para el cálculo de la temperatura de salida del tanque se realiza el balance de energía siguiente:

$$Q_{perdido} = Q_{ganado} \quad (45)$$

$$M_s * Cp_s * (T_2 - T_1) + M_a * Cp_a * (T_2 - T_1) + M_{HCl} * Cp_{HCl} * (T_2 - T_1) + M_h * Cp_h * (T_2 - T_1) = M_p * Cp_p * (T_2 - T_1) \quad (46)$$

Donde:

$M_p$ : Flujo másico de la porquinaza.

$Cp_p$ : Capacidad calorífica de la porquinaza.

$Cp_s$ : Capacidad calorífica del sargazo.

$Cp_a$ : Capacidad calorífica del agua.

$Cp_{HCl}$ : Capacidad calorífica del HCl.

$Cp_h$ : Capacidad calorífica del hongo.

$T_1$ : Temperatura inicial.

$T_2$ : Temperatura final de la mezcla.

En la tabla E.14 se presentan los resultados para obtener la temperatura a la salida del tanque homogenizador.

Tabla E.14. Cálculo temperatura de la corriente a la salida del tanque homogenizador V-103. Datos obtenidos de Smith, Van Ness, & Abbott (2007), Krunal Acid Agency (2014) y Fernández Rivera (2017).

Concepto	Valor
A	8.712
B	0.00125
C	-0.00000018
T media	305.0479945
Cp/R [K]	9.076560223
R [J/(mol*K)]	8.314
Cp [J/(mol*K)]	75.46
Cp agua [J/(Kg*K)]	4,192.36
Cp HCl [J/(Kg*K)]	2,460
Cp sargazo/hongo [J/(Kg*K)]	1,500

Cp porquinaza [J/(Kg*K)]	4,180
T1 agua [K]	308.15
T1 HCl [K]	308.15
T1 sargazo [K]	308.15
T1 hongo [K]	308.15
T1 porquinaza [K]	299.15
T2 [K]	301.95
Qp [J/h]	362,461,271.28
Qg [J/h]	362,461,271.28
objetivo	0.00

La temperatura a la salida del tanque de homogenización es de 302 K lo que es igual a 28.8 °C.

### 10.5 Biodigestor V-201.

#### Cálculo flujo de biogás.

Para calcular el flujo de biogás se utiliza la siguiente ecuación (Olaya & Octavio, 2009).

$$(M_i)(\%ST)_i(\%SV_i)(V_{bi}) = F_{biogás} \quad (47)$$

Donde:

$M_i$ : Flujo másico de biomasa  $i$ .

$\%ST_i$ : Sólidos totales de la biomasa  $i$ .

$\%SV_i$ : Sólidos volátiles de la biomasa  $i$ .

$V_{bi}$ : Volúmen de biogás producido por masa de sólidos volátiles de la biomasa  $i$ .

$F_{biogás}$ : Flujo volumétrico de biogás.

Los %ST y %SV para el sargazo son obtenidos de Maneein, Milledge, Harvey, & Nielsen (2020) mientras que el valor  $V_b$  para el sargazo se obtiene de Tapia-Tussell (2018). Los valores de %ST, %SV y  $V_b$  para los purines porcinos se toman de los datos presentados en Consejería de economía, innovación y ciencia (2011).

El cálculo del flujo de metano se obtiene utilizando la composición de metano reportada para el biogás proveniente del sargazo por Tapia-Tussell (2018) y la composición de metano reportada para biogás proveniente de purines porcinos por Nagy & Wopera (2012).

$$F_{CH_4i} = (F_{biogasi})(x_{CH_4i}) \quad (48)$$

Donde:

$F_{CH_4i}$ : es el flujo de metano producido por la biomasa  $i$ .

$x_{CH_4i}$ : Composición de metano en el biogás de  $i$ .

El flujo total de biogás y metano obtenido es la suma de los flujos obtenidos para el sorgo y los purines porcinos. En las tablas E.15, E.16 y E.17 se presentan los resultados para el cálculo de biogás y metano producido.

$$F_{\text{biogás total}} = F_{\text{biogás sorgo}} + F_{\text{biogás porquinaza}} \quad (49)$$

$$F_{\text{CH}_4 \text{ total}} = F_{\text{CH}_4 \text{ sorgo}} + F_{\text{CH}_4 \text{ porquinaza}} \quad (50)$$

Tablas E.15. Biogás producido por sorgo. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Volumen biogás [m <sup>3</sup> biogás/kg SV]	Vb	0.20
Composición CH <sub>4</sub>	X <sub>CH<sub>4</sub></sub>	0.52
% Sólidos totales macroalga	% ST	0.1220
% Sólidos volátiles macroalga	% SV	0.8640
Volumen gas CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV]	Vmetano	0.10
Biogás producido [m <sup>3</sup> biogás/día]	F biogás	5,059.58
Metano producido [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día]	F CH <sub>4</sub>	2,630.98

Tablas E.16. Biogás producido por purines porcinos. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Volumen biogás [m <sup>3</sup> biogás/kg SV]	Vb	0.3470
Composición CH <sub>4</sub>	X <sub>CH<sub>4</sub></sub>	0.6000
% Sólidos totales purín	% ST	0.0640
% Sólidos volátiles purín	% SV	0.6550
Volumen gas CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV]	Vmetano	0.2082
Biogás producido [m <sup>3</sup> biogás/día]	F biogás	10,473.29
Metano producido [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día]	F CH <sub>4</sub>	6,283.98

Tabla E.17. Biogás total. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Biogás total [m <sup>3</sup> biogás/día]	F biogás	15,532.88
Gas metano total [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día]	F CH <sub>4</sub>	8,914.96

La composición de metano y de sulfuro de hidrógeno obtenida en el biogás resultante se calcula por balances de materia con las siguientes expresiones.

$$x_{\text{sCH}_4} F_{\text{bs}} + x_{\text{pCH}_4} F_{\text{bp}} = x_{\text{tCH}_4} F_{\text{bt}} \quad (51)$$

$$x_{\text{sH}_2\text{S}} F_{\text{bs}} + x_{\text{pH}_2\text{S}} F_{\text{bp}} = x_{\text{tH}_2\text{S}} F_{\text{bt}} \quad (52)$$

$$F_{\text{bs}} + F_{\text{bp}} = F_{\text{bt}} \quad (53)$$

Donde:

$x_{si}$ : Composición mol de  $i$  en biogás producido por sargazo.

$x_{pi}$ : Composición mol de  $i$  en biogás producido por purines porcinos.

$x_{ti}$ : Composición mol de  $i$  en biogás final.

$F_{bs}$ : Flujo de biogás producido por sargazo.

$F_{bp}$ : Flujo de biogás producido por purines.

$F_{bt}$ : Flujo de biogás total.

Resolviendo se obtiene que la composición mol de metano para la mezcla de biogás a la salida del biodigestor V-201 es de 57.39% y la composición del sulfuro de hidrógeno es de 0.54%. En la tabla E.18 se presentan las fracciones mol, flujos másicos y flujos molares del biogás obtenido en el biodigestor y simulado en Aspen Hysys.

Tabla E.18. Composición molar y flujos del biogás obtenido por digestión anaeróbica. Elaboración propia.

Compuesto	Fracción mol	Flujo molar [kmol/h]	Flujo másico [kg/h]
CH <sub>4</sub>	0.57	14.34	230.00
CO <sub>2</sub>	0.22	5.57	245.00
H <sub>2</sub>	0.01	0.26	0.53
O <sub>2</sub>	0.01	0.27	8.52
N <sub>2</sub>	0.02	0.53	14.92
H <sub>2</sub> O	0.16	3.89	70.06
H <sub>2</sub> S	0.01	0.13	4.50
Total	1.00	24.99	573.53

#### Cálculo relación C:N y %ST en biodigestor.

El sargazo a pesar de presentar relaciones C:N bajas ha demostrado poder producir biogás en Tapia-Tussell (2018). Tanto el sargazo como los purines porcinos poseen relaciones C:N bajas no ideales para el proceso de digestión anaeróbica, el sargazo de acuerdo con Milledge & Harvey (2016) y Maneein, Milledge, Harvey, & Nielsen (2020) tiene una relación C:N de 7, mientras que los purines porcinos poseen una relación C:N de 4.3 (Varnero, Muñoz, & Zúñiga, 2009). Para mejorar la relación C:N se mezcla el sargazo y los purines porcinos con desechos de madera los cuales tienen una relación C:N de 500 (Masabni & Lillard, 2010). El cálculo de la nueva relación C:N se obtiene por medio de la siguiente ecuación (Olaya & Octavio, 2009).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n C_i M_i}{\sum_{i=1}^n N_i M_i} \quad (54)$$

Donde:

$K$ : Relación C: N resultante de la combinación de diferentes biomásas.

$M_i$ : Flujo másico de la biomasa  $i$ .

$C_i$ : Porcentaje de carbono en la biomasa  $i$ .

$N_i$ : Porcentaje de nitrógeno en la biomasa  $i$ .

Utilizando la ecuación (54) se busca el flujo másico de aserrín que devuelva una relación de C:N de 25, valor ideal para realizar la digestión anaeróbica.

Para calcular el porcentaje de sólidos totales en el biodigestor se hace un balance de sólidos totales.

$$(M_s)(\%ST_s) + (M_p)(\%ST_p) + (M_{as})(\%ST_{as}) = (M_s + M_p + M_{as} + M_a)(\%ST_{final}) \quad (55)$$

Donde:

$M_i$ : Flujo másico de  $i$ .

$\%ST_i$ : Porcentaje de sólidos totales de  $i$ .

$i$  se define como:  $s$  (sargazo),  $p$  (purines porcinos),  $as$  (aserrín) y  $a$  (agua).

El porcentaje de sólidos totales para los desechos de madera es obtenido de Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña (2018). En la tabla E.19 se presentan los resultados para el cálculo de flujo másico de los desechos de madera y %ST en el biodigestor.

Tabla E.19. Cálculo flujo másico de aserrín y %ST en el biodigestor. Elaboración propia.

Concepto	Valor
Flujo sargazo [kg/día]	240,000.00
%ST sargazo	15%
C:N sargazo	7.00
Flujo purín [kg/día]	720,000.00
%ST purín	6.4%
C:N purín	4.3
Flujo desechos de madera [kg/día]	40,471.58
%ST desechos de madera	90.3%
C:N desechos de madera	500
Flujo de agua [kg/día]	240,000.00
C:N final	25.00
Objetivo	0.00
%ST final	9.7%

El flujo másico de los desechos de madera para obtener una relación C:N de 25 es de 40,471.58 kg/día y el porcentaje de sólidos totales en la mezcla de biomasa es de 9.7%.

Flujo másico de entrada al biodigestor.

El flujo de biomasa diaria alimentada al biodigestor V-201 es:

$$M_b = \sum_{i=1}^n M_i \quad (56)$$

Donde:

$M_b$ : Es el flujo másico total de biomasa.

$M_i$ : Es el flujo másico de las corrientes de entrada.

En la tabla E.20 se presentan los flujos de biomasa en kg/s.

Tabla E.20. Flujos másicos de biomasa en kg/s alimentadas al biodigestor V-201. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico total [kg/s]	Mtotal	14.64
Flujo másico sargazo [kg sargazo/s]	Msargazo	2.78
Flujo másico agua [kg agua/s]	Magua	2.78
Flujo másico HCl [kg HCl/s]	M HCl	0.00
Flujo másico hongo [kg hongo/s]	M hongo	0.28
Flujo másico purín [kg purín/s]	Mpurín	8.33
Flujo másico aserrín [kg desechos de madera/ s]	Maserrín	0.47

Para obtener el flujo volumétrico se procede a multiplicar por la densidad de la mezcla, se supone una densidad de 1,000 kg/m<sup>3</sup>.

$$Q_b = (M_b)(\rho_M) \quad (57)$$

Donde:

$Q_b$ : Es el flujo volumétrico.

$\rho_M$ : Es la densidad de la mezcla.

Con el flujo volumétrico calculado es posible estimar el volumen del biodigestor V-201 utilizando un tiempo de retención hidráulico de 15 días, el volumen de diseño se calcula con la expresión (33), las dimensiones para la altura y diámetro son las calculadas por Aspen Capital Cost, en la tabla E.21 se presentan los resultados para el volumen del biodigestor.

Tabla E.21. Dimensiones y volumen del biodigestor V-201. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico de entrada al biodigestor [kg/día]	Mb	1,264,472.11
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	1,000.00
Flujo volumétrico entrada biodigestor [m <sup>3</sup> /día]	Qb	1,264.47
Tiempo de retención [días]	Tr	15.00
Volumen diseño [m <sup>3</sup> ]	Vd	18,968.00
Diámetro [Aspen Capital Cost]	D	41.00
Altura [Aspen Capital Cost]	H	14.63

Para conocer la cantidad de digestato producido aplicamos un balance de materia sobre el biodigestor y resolvemos para el flujo másico de digestato. En la tabla E.22 se presentan los flujos de entrada y salida del biodigestor.

$$M_{entrada} = M_{salida} \quad (58)$$

$$M_{biomasa} = M_{biogás} + M_{digestato} \quad (59)$$

Tabla E.22. Flujos de entrada y salida para el biodigestor V-201. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico total entrada [kg/día]	Mtotal	1,264,472.11
Flujo másico biogás salida [kg/día]	Mbiogás	13,761.60
Flujo másico digestato [kg/día]	Mdigestato	1,250,710.51

### 10.6 Cálculo energético de biodigestor V-201 e intercambiador de calor E-201.

El biodigestor debe mantenerse a una temperatura constante de 55 °C para llevar a cabo de manera exitosa la conversión de la biomasa en biogás. Se utilizan las dimensiones del biodigestor calculadas por Aspen Capital Cost para calcular las pérdidas de calor en las superficies del equipo con la siguiente expresión.

$$q = U * A * \Delta T \quad (60)$$

Al igual que en el tanque de pretratamiento V-102 se toma el valor de U de 1.7 W/(m<sup>2</sup>\*K) de acuerdo a los valores reportados en Téllez Santana (2008) y Janusz Teleszewski & Zukowski (2018). La energía requerida para aumentar la temperatura de la corriente de biomasa 2 en el intercambiador E-201 antes de ser alimentada al biodigestor es calculada con la siguiente expresión:

$$q = M * Cp * \Delta T \quad (61)$$

Para conocer el Cp de la mezcla utilizamos la siguiente ecuación (Valiente, 2008):

$$Cp_{mezcla} = \sum_{i=1}^n (Cp_i)(x_{wi}) \quad (62)$$

Donde:

$Cp_i$ : Capacidad calorífica de  $i$ .

$x_{wi}$ : Fracción masa de  $i$ .

El calor total requerido por el biodigestor V-201 y el intercambiador de calor E-201 es:

$$q_T = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (63)$$

Donde:

$q_T$ : Calor total requerido por el proceso de digestión anaerobia.

$q_1$ : Calor perdido por las paredes del biodigestor.

$q_2$ : Calor perdido por el techo del biodigestor.

$q_3$ : Calor perdido por el suelo del biodigestor.

$q_4$ : Calor requerido en el intercambiador de calor.

En la tabla E.23 se presenta el Cp utilizado para realizar los cálculos y en la tabla E.24 se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla E.23. Cálculo Cp de la mezcla de biomasa. Datos obtenidos de Smith, Van Ness, & Abbott (2007), Krunal Acid Agency (2014), Fernández Rivera (2017), Nolan (2012) y Pacheco, Bertot & Juliá Junco (2006)

Concepto	Valor
Cp agua [J/(kg*K)]	4,190.57
Cp HCl [J/(kg*K)]	2,460.00
Cp sargazo/hongo [J/(kg*K)]	1,500.00
Cp purín [J/(kg*K)]	4,180.00
Cp desechos de madera [J/(kg*K)]	2,512.08
Cp biomasa [J/(kg*K)]	3,540.65

Tabla E.24. Requerimientos energéticos de biodigestor V-201 e intercambiador E-201. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Temperatura interna biodigestor [°C]	T2	55.0
Temperatura tierra húmeda [°C]	T1	5.0
Temperatura promedio Quintana Roo [°C]	T1'	26.0
Temperatura biomasa entrada [°C]	T1''	28.8
Superficie cilíndrica biodigestor [m <sup>2</sup> ]	A1	1,884.4
Superficie piso del biodigestor [m <sup>2</sup> ]	A2	1,320.3
Superficie techo biodigestor [m <sup>2</sup> ]	A3	1,320.3
Perdidas por las paredes [kW]	q1	93.1
Perdidas por el techo [kW]	q2	65.2
Perdidas por el suelo [kW]	q3	112.5
Calor requerido por el biodigestor V-201 [kW]	q biodigestor	270.8
Calor requerido por intercambiador E-201 [kW]	q4	1,356.6
Calor total requerido por el proceso de digestión [kW]	qT	1,627.4

### 10.7 Cálculos proceso de composta.

En esta sección se estima la cantidad de composta que es posible obtener a partir del tratamiento de digestato. Primero se calcula la cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles contenidos en la mezcla de biomasa antes de ser digeridos en el biodigestor V-201, el cálculo de sólidos totales y volátiles se hace de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$ST_i = F_i * \%ST_i \quad (64)$$

$$SV_i = ST_i * \%SV_i \quad (65)$$

Donde:

$ST_i$ : Sólidos totales de la biomasa  $i$ .

$F_i$ : Flujo másico de la biomasa  $i$ .

$\%ST_i$ : Porcentaje de sólidos totales de la biomasa  $i$ .

$SV_i$ : Sólidos volátiles de la biomasa  $i$ .

$\%SV_i$ : Porcentaje sólidos volátiles de la biomasa  $i$ .

En la tabla E.25 se muestran los resultados.

Tabla E.25. Sólidos totales y volátiles en la biomasa inicial. Elaboración propia.

Materia prima	ST (kg/día)	SV(kg/día)
Sargazo	29,280.00	25,297.92
Purín	46,080.00	30,182.40
Aserrín	36,545.83	22,603.60
Total	111,905.83	78,083.92

El flujo másico de biogás producido después del proceso de digestión anaerobia se considera como la cantidad de sólidos volátiles degradados. Los sólidos volátiles sin degradar son la diferencia entre los sólidos volátiles iniciales y los sólidos volátiles degradados, por otra parte, los sólidos totales al finalizar el proceso anaerobio son la diferencia entre los sólidos totales iniciales y los sólidos volátiles degradados. En la tabla E.26 se muestran la cantidad de sólidos totales y volátiles después de la degradación anaeróbica en el biodigestor V-201.

Tabla E.26. Sólidos totales y sólidos volátiles presentes en el digestato. Elaboración propia.

Concepto	Valor
% Degradación SV	17.62%
SV degradados [kg SV/día]	13,761.60
SV sin degradar [kg SV/día]	64,322.32
ST en digestato [kg SV/día]	98,144.23

El digestato obtenido del biodigestor V-201 se separa en una fracción sólida y una fracción líquida mediante el decantador centrífugo M-401, se considera que en la fracción sólida se recupera el 95% de los sólidos con un 70% de humedad (Suárez, Jácome, & Rodríguez, 2015), los cálculos se realizan con las siguientes expresiones y los resultados se presentan en la tabla E.27.

$$S = 0.95 * ST_d \quad (66)$$

Donde:

$S$ : Sólidos recuperados en la fracción sólida del digestato.

$ST_d$ : Sólidos totales en el digestato.

$$A = \frac{H*S}{(1-H)} \quad (67)$$

Donde:

$A$ : Flujo másico de agua en el digestato.

$H$ : Porcentaje de humedad.

Tabla E.27. Fracción sólida del digestato. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Agua [kg agua/día]	A	217,553.05
Sólidos recuperados [kg sólidos/día]	S	93,237.02
Total [kg/día]	M	310,790.07
% Humedad	H	70%

La fracción sólida obtenida es mezclada con diferentes residuos para obtener las propiedades adecuadas de humedad y relación C:N para el proceso de composta. En la tabla 4.23 se presentan las características de los residuos utilizados y los flujos máscicos propuestos para mezclarse con la fracción sólida del digestato. El cálculo de la relación C:N en la mezcla de residuos se hace con la ecuación (54) utilizada en el diseño del biodigestor. El cálculo de la humedad de la mezcla se realiza con la siguiente expresión:

$$H_R = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i * H_i)}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (68)$$

Donde:

$R_i$ : Flujo máscico del residuo  $i$ .

$H_R$ : Humedad mezcla de residuos.

$H_i$  = Humedad del residuo  $i$ .

El flujo máscico de los residuos agregados a la fase sólida del digestato obtenida del decantador centrífugo M-401 se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$R_T = M * \frac{(H_3 - H_1)}{(H_2 - H_3)} \quad (69)$$

Donde:

$R_T$ : Flujo máscico de residuos.

$M$ : Flujo máscico de la fracción sólida del digestato.

$H_1$ : Humedad fracción sólida del digestato.

$H_2$ : Humedad de residuos.

$H_3$ : Humedad final para proceso de composta.

En la tabla E.28 se presentan los resultados para los residuos requeridos por el proceso de composta.

Tabla E.28. Flujo máscico, humedad y relación C:N de la mezcla de residuos. Elaboración propia.

Concepto	Valor
Flujo máscico total [kg/s]	2.30
Humedad mezcla	44.38%
Relación C:N mezcla	56.90

En la ecuación (69) la humedad requerida por el proceso de composta ( $H_3$ ) se fija en 60%, la relación C:N de los residuos agregados es la indicada en la tabla E.28 mientras que la relación C:N de la fracción sólida del digestato se supone de 12.3 de acuerdo con Bernal Calderón, Alburquerque Méndez, Bustamante Muñoz, & Clemete Carrillo (2011). El material enviado al proceso de composta tiene una humedad del 60% y una relación C:N de 29.7 ambos valores se encuentran dentro de lo recomendado en la literatura (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). En la tabla E.29 se presenta el flujo másico del material enviado al proceso de composta.

Tabla E.29. Flujo másico de material a compostar. Elaboración propia.

Concepto	Valor
Masa digestato fracción sólida [kg/s]	3.60
Masa residuos a agregar [kg/s]	2.30
Masa total a compostar [kg/s]	5.90
% Humedad	60%
Materia seca [kg/s]	2.36
Agua [kg/s]	3.54

Durante el proceso de composta se degrada parte de la materia orgánica presente en el material a compostar, para realizar el cálculo de materia orgánica degradada se establece el valor de 28% de degradación, valor tomado reportado por Isaza Arias, Pérez Méndez, Laines Canepa , & Castañón Nájera (2009) y que corresponde a la degradación de material orgánico en 4 meses. La cantidad de humedad final en la composta se fija en un 35.5%, el valor se encuentra dentro del rango recomendado (Dirección general de normas, 2018). Para obtener la cantidad de composta producida se debe calcular el material orgánico presente en la mezcla a compostar, el cálculo se hace por medio de la siguiente expresión:

$$MO_{inicial} = S * \%MO_D + A * \%ST_A * \%MO_A + R_T * \%ST_R * \%MO_R \quad (70)$$

Donde:

$MO_{inicial}$ : Materia orgánica inicial.

$\%MO_D$ : Porcentaje de materia orgánica inicial en la fracción sólida del digestato.

$\%MO_A$ : Porcentaje de materia orgánica inicial en los residuos de madera.

$\%MO_R$ : Porcentaje de materia orgánica inicial en los residuos.

$\%ST_A$ : Porcentaje de sólidos totales en los desechos de madera.

$\%ST_R$ : Porcentaje de sólidos totales en los residuos agregados.

$S$ : Sólidos recuperados de la fracción sólida del digestato.

$A$ : Flujo másico de residuos de madera.

$R_T$ : Flujo másico de residuos agregados a la fracción sólida del digestato.

La materia orgánica de los residuos de madera (%MO<sub>A</sub>) se obtiene de Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Soste (2016) y la materia orgánica de la fracción sólida del digestato se calcula como:

$$\%MO_D = \frac{SV_D}{ST_D} \quad (71)$$

Donde:

$SV_D$ : Flujo másico de sólidos volátiles en el digestato.

$ST_D$ : Flujo másico de sólidos totales en el digestato.

Para calcular la materia orgánica en los residuos (%MO<sub>R</sub>) se utiliza:

$$\%MO_R = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i * \%MO_i)}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (72)$$

Donde:

$R_i$ : Flujo másico del residuo  $i$ .

$\%MO_R$ : Porcentaje de materia orgánica en la mezcla de residuos.

$\%MO_i$ : Porcentaje de materia orgánica del residuo  $i$ .

En la tabla E.30 se presenta el porcentaje de material orgánico obtenido para los residuos.

Tabla E.30. Cálculo de materia orgánica inicial en residuos. Datos obtenidos de Gayosso, Borges, Villanueva, Estrada, & Garruña (2018) y González Sánchez, Pérez Fabiel, Wong Villareal, Bello Mendoza, & Yañez Ocampo (2015). Elaboración propia.

Residuo	%MO
Hojas recién caídas	77.20%
Hoja de dzidzilche	77.20%
Bagazo de henequén	64.70%
Fibra de coco	97.80%
Residuos de fruta	70.50%
Materia orgánica mezcla	76.96%

Conociendo la materia orgánica inicial, el porcentaje de degradación de materia orgánica y la humedad final del producto se calcula la cantidad de composta producida. En la tabla E.31 se presentan los resultados. El contenido de materia seca y humedad de la composta se calcula de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$MO_d = MO_i * \%D \quad (73)$$

$$MO_f = MO_i - MO_d \quad (74)$$

$$MS_f = MS_i - MO_d \quad (75)$$

$$A_f = \frac{H_f * MS_f}{1 - H_f} \quad (76)$$

Donde:

$MO_d$ : Materia orgánica degradada.

$MO_i$ : Materia orgánica inicial.

$MO_f$ : Materia orgánica final en la composta.

%D: Porcentaje de degradación de materia orgánica.

$MS_f$ : Materia seca final en la composta.

$MS_i$ : Materia seca inicial en el material a compostar.

$A_f$ : Cantidad de agua final en la composta.

$H_f$ : Humedad final en la composta.

Tabla E.31. Producción de composta. Elaboración propia.

Concepto	Valor
MO inicial [kg/s]	1.95
% Degradación MO	28.0%
MO degradado [kg/s]	0.55
MO en composta [kg/s]	1.41
Masa sólidos en composta [kg/s]	1.81
Agua [kg/s]	1.00
%humedad	35.5%
Masa de composta [kg/s]	2.81

De la tabla E.29 tenemos un flujo másico de 5.9 kg/s de material enviado al proceso de composta, en la tabla E.31 se calcula un flujo másico de 2.81 kg/s de composta producida, por lo tanto, por medio de un balance de materia se obtiene que el flujo másico de agua evaporada y compuestos degradados tiene un valor de 3.09 kg/s.

### 10.8 Flujos másicos y concentración de sólidos volátiles para la fracción líquida del digestato.

La fracción líquida del digestato obtenida del decantador centrífugo M-401 se calcula por medio de un balance de materia sobre el decantador centrífugo, los flujos másicos de entrada y salida del decantador centrífugo M-401 se presentan en la tabla E.32.

$$D = M + L \quad (77)$$

Donde:

$D$ : Flujo másico de digestato.

$M$ : Flujo másico de la fracción sólida.

$L$ : Flujo másico de la fracción líquida.

Tabla E.32. Balance de materia sobre el decantador centrífugo M-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo másico digestato [kg/s]	D	14.48
Flujo másico fracción sólida del digestato [kg/s]	M	3.60
Flujo másico fracción líquida del digestato [kg/s]	L	10.88

Se considera que el 95% de los sólidos se recupera en la fracción sólida del digestato al separarse en el decantador centrífugo M-401, esto implica que el 5% de los sólidos se encuentran en la fracción líquida, la concentración de sólidos en la fracción líquida se calcula con la siguiente expresión:

$$ST_L = ST_D * \%S_{nr} \quad (78)$$

Donde:

$ST_L$ : Flujo másico de sólidos totales contenidos en la fracción líquida.

$ST_D$ : Flujo másico de sólidos totales contenidos en el digestato.

$\%S_{nr}$ : Porcentaje de sólidos no recuperados en la fracción sólida del digestato.

La concentración en masa de sólidos en la fracción líquida del digestato se calcula con:

$$C_m = \frac{ST_L}{L} \quad (79)$$

Donde:

$C_m$ : Concentración en masa de los sólidos en la fracción líquida del digestato.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla E.33.

Tabla E.33. Concentración [%m/m] de sólidos en la fracción líquida del digestato. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
% Sólidos no recuperados	$\%S_{nr}$	5%
Sólidos totales en la fracción líquida [kg/s]	$ST_L$	0.06
Flujo másico fracción líquida del digestato [kg/s]	L	10.88
% Sólidos	$C_m$	0.52%

Para estimar la cantidad de sólidos volátiles en la fracción líquida del digestato se calcula primero el porcentaje de sólidos volátiles en la corriente de digestato a partir de los resultados de la tabla E.26 y la expresión (71). Se considera que el porcentaje de sólidos volátiles en el digestato es igual al porcentaje de sólidos volátiles en la fracción líquida del digestato. Utilizando el valor de  $ST_L$  de la tabla E.33 podemos determinar el flujo másico de sólidos volátiles en la fracción líquida del digestato a partir de las siguientes expresiones.

$$\%SV_D = \%SV_L \quad (80)$$

$$SV_L = \%SV_L * ST_L \quad (81)$$

Donde:

$ST_L$ : Flujo másico de sólidos totales contenidos en la fracción líquida.

$SV_L$ : Flujo másico de sólidos volátiles contenidos en la fracción líquida.

$\%SV_L$ : Porcentaje de sólidos volátiles en la fracción líquida.

El flujo volumétrico de la fracción líquida se obtiene bajo la suposición de que la densidad de esta corriente es la del agua por lo que se considera de 1,000 kg/m<sup>3</sup>, la concentración de sólidos volátiles en kg/m<sup>3</sup> se obtiene con la siguiente ecuación:

$$C_{m/v} = \frac{SV_L}{L * \rho_A} \quad (82)$$

Donde:

$C_{m/v}$ : Concentración en  $\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$  de sólidos volátiles.

$\rho_A$ : Densidad de la fracción líquida del digestato.

En la tabla E.34 se presentan los cálculos para obtener la concentración de sólidos volátiles en kg/m<sup>3</sup> para la fracción líquida del digestato.

Tabla E.34. Concentración [%m/v] de sólidos volátiles en la fracción líquida del digestato. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
SV digestato [kg SV/día]	SVD	64,322.32
ST digestato [kg ST/día]	STD	98,144.23
% SV en digestato	%SVD	65.54%
ST en fracción líquida [kg ST/día]	STL	4,907.21
SV fracción líquida [kg SV/día]	SVL	3,216.12
Flujo volumétrico fracción líquida [m <sup>3</sup> /día]	QL	939.92
SV fracción líquida [kg SV/m <sup>3</sup> ]	C <sub>m/v</sub>	3.42

### 10.9 Tanque de aireación V-401.

El cálculo del tanque de aireación V-401 se hace siguiendo la metodología de CONAGUA (2019), en las tablas E.35, E.36, E.37 y E.38 se definen los datos utilizados para realizar el diseño del tanque.

Tabla E.35. Datos corrientes de entrada al tanque de aireación V-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo entrada tanque lodos [m <sup>3</sup> /h]	Q	39.16
Flujo entrada tanque lodos [m <sup>3</sup> /día]	Q	939.92
DBO de entrada al tanque de lodos [kg/m <sup>3</sup> ]	S	0.172
Sólidos suspendidos volátiles [kg/m <sup>3</sup> ]	SSV	3.42

Temperatura [°C]	T <sub>amb</sub>	17
------------------	------------------	----

Los datos son los calculados en este trabajo con excepción de la DBO la cual es obtenida de (Soria Fregoso, y otros, 2001). La temperatura se especifica como la mínima en Quintana Roo.

Tabla E.36. Especificaciones corrientes de salida tanque V-401. Valores recomendados de CONAGUA (2019). Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
DBO salida tanque de lodos [kg/m <sup>3</sup> ]	Se	0.005
Sólidos suspendidos volátiles efluente [kg/m <sup>3</sup> ]	SSVe	0.01

Tabla E.37. Información diseño de reactor. Valores recomendados de CONAGUA (2019).

Concepto	Símbolo	Valor
Sólidos suspendidos volátiles mezcla licor [kg/m <sup>3</sup> ]	SSVLM	4
Sólidos suspendidos volátiles recirculación [kg/m <sup>3</sup> ]	SSVR	12
Tiempo de retención celular [días]	TRMC	15

Tabla E.38. Parámetros biocinéticos utilizados en los cálculos. Obtenidos de CONAGUA (2019).

Símbolo	Valor
k [m <sup>3</sup> /(kg*día)]	17
φ	1.03
Y [kg SSVLM producidos/kg DBO]	0.7
k <sub>d</sub> [1/día]	0.06
k <sub>dn</sub> [1/día]	0.08
Φ <sub>kd</sub>	1.05
Φ <sub>kdn</sub>	1.053
fd	0.15

La siguiente sección presenta las ecuaciones utilizadas para el diseño del tanque de aireación V-401.

#### Potencia requerida para la aireación V-401.

Se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la potencia.

$$W = \frac{Q(S-S_e)}{21} \quad (83)$$

Donde:

*W*: Potencia requerida para la aireación en hp.

La potencia necesaria para la aireación es de 7.47 hp o 5.65 kW.

#### Temperatura de tanque de aireación V-401.

Expresión para el cálculo de la temperatura del tanque de aireación, la temperatura se reporta en la tabla E.39.

$$T_a = \frac{41.66667*Q*T+1134*W*T_{amb}}{41.66667*Q+1134*W} \quad (84)$$

Donde:

$T_a$ : Temperatura del reactor.

$T$ : Temperatura de la corriente de entrada al tanque de aireación.

Tabla E.39. Temperatura del tanque de aireación V-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Temperatura alimentación agua [°C]	T	40
Temperatura ambiente [°C]	$T_{amb}$	17
Temperatura reactor biológico [°C]	$T_a$	36

#### Ajuste de parámetros biocinéticos.

El ajuste de los parámetros biocinéticos debido a la temperatura del tanque aerobio, se utilizan las siguientes ecuaciones y se presenta el resultado en la tabla E.40.

$$K_{T_a} = k * \phi^{(T_a-20)} \quad (85)$$

$$k_{dT_a} = k_d * \phi_{kd}^{(T_a-20)} \quad (86)$$

Tabla E.40. Parámetros biocinéticos ajustados por temperatura. Elaboración propia.

Símbolo	Valor
$K_{T_a}$ [m <sup>3</sup> /(kg*día)]	27.2057291
$k_{dT_a}$ [1/día]	0.13038435

#### Tiempo de retención hidráulico.

Se utiliza la siguiente expresión para el cálculo del tiempo de retención hidráulico y se presenta el resultado en la tabla E.41.

$$TRH = \frac{(S-S_e)}{K_{T_a}*SSVLM*S_e} \quad (87)$$

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico.

Tabla E.41. Tiempo de retención hidráulico para el tanque de aireación V-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Tiempo de retención hidráulico [día]	TRH	0.31
Tiempo de retención hidráulico [h]	TRH	7.37

#### Cálculo DBO del efluente.

Expresión para cálculo de DBO en el efluente.

$$S_e = \frac{S}{1 + k_{Ta} * SSVLM * TRH} \quad (88)$$

El valor obtenido de  $S_e$  debe ser menor o igual al valor supuesto en la tabla E.36, para el diseño del tanque V-401  $S_e$  es igual al supuesto con un valor de  $0.005 \text{ kg/m}^3$ .

#### Cálculo volumen tanque V-401.

Expresión para cálculo del volumen del tanque de aireación.

$$V = Q * TRH \quad (89)$$

El volumen del tanque de aireación V-401 es de  $307.5 \text{ m}^3$

#### Producción neta de biomasa.

Expresión para calcular la producción neta de biomasa, este valor se requiere para calcular la recirculación al tanque de aireación V-401, el resultado se presenta en la tabla E.42.

$$\Delta X = \frac{Q * Y * (S - S_e)}{1 + k_{dT_a} * TRMC} + \frac{Q * Y * (S - S_e) * TRMC * f_d * k_{dT_a}}{(1 + k_{dT_a} * TRMC)} \quad (90)$$

Tabla E.42. Producción neta de biomasa. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Producción neta de biomasa [kg/día]	$\Delta X$	48.08

#### Cálculo de relación de recirculación.

La relación de recirculación al tanque de aireación V-401 se obtiene mediante la siguiente expresión, el resultado se presenta en la tabla E.43.

$$r = \frac{Q * SSVLM - \Delta X - Q * SSV}{Q * (SSV_R - SSVLM)} \quad (91)$$

Tabla E.43. Relación de recirculación. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Relación recirculación	r	0.065894765

#### Balances de materia en el tanque de aireación V-401.

El cálculo de los flujos volumétricos de entrada y salida del tanque de aireación V-401 se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$Q_R = rQ \quad (92)$$

$$Q_m = Q + Q_R \quad (93)$$

$$Q_p = \frac{\Delta X + Q * SSV - Q * SSV_e}{SSV_R - SSV_e} \quad (94)$$

$$Q_e = Q - Q_p \quad (95)$$

$$Q_l = Q_p + Q_e \quad (96)$$

Donde:

$Q_R$ : Flujo volúmetrico de recirculación.

$Q_m$ : Flujo volúmetrico salida tanque de aireación.

$Q_p$ : Flujo volúmetrico de la purga.

$Q_e$ : Flujo volúmetrico de agua clarificada.

$Q_l$ : Flujo volúmetrico salida del clarificador.

En la tabla E.44 se muestran los flujos volumétricos de entrada y salida para el tanque de aireación V-401.

Tabla E.44. Flujos volumétricos del tanque de aireación V-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo de recirculación [m <sup>3</sup> /día]	Qr	61.94
Flujo salida tanque de lodos [m <sup>3</sup> /día]	Qm	1,001.86
Flujo de purga [m <sup>3</sup> /día]	Qp	271.46
Flujo agua clarificada [m <sup>3</sup> /día]	Qe	668.46
Flujo salida de lodos clarificador [m <sup>3</sup> /día]	Ql	939.92

Considerando que la densidad de los flujos volumétricos es igual a la del agua obtenemos los flujos máscicos presentados en la tabla E.45.

Tabla E.45. Balances de materia en el tanque de aireación V-401. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo de recirculación [kg/s]	Mr	0.72
Flujo salida tanque de aireación [kg/s]	Mm	11.60
Flujo de purga [kg/s]	Mp	3.14
Flujo agua clarificada [kg/s]	Me	7.74
Flujo salida de lodos clarificador [kg/s]	MI	3.86

### 10.10 Clarificador V-402.

Para el diseño del clarificador se utiliza una carga hidráulica de 40 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>\*día) el valor se encuentra dentro del rango especificado en los criterios de diseño señalados en CONAGUA (2019), para obtener el área de sedimentación se sigue la siguiente expresión.

$$A_s = \frac{Q_m}{CH} \quad (97)$$

Donde:

$A_s$ : Área de sedimentación.

$Q_m$ : Flujo volumétrico de entrada al clarificador.

$CH$ : Carga hidráulica.

El diámetro del clarificador se calcula con:

$$D = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (98)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del decantador.

El diámetro obtenido es redondeado al número entero superior más próximo y el valor es utilizado para recalculer el área de sedimentación resolviendo la ecuación (98) para  $A_s$ . A continuación, se propone una altura de 4m para el cálculo del volumen del clarificador V-402, el valor de la altura es adecuado y está dentro del rango de los criterios de diseño de CONAGUA (2019), el volumen se calcula con la siguiente expresión:

$$V_C = A_s * h \quad (99)$$

Donde:

$V_C$ : Volumen del clarificador.

$h$ : Altura del clarificador.

Por último, para conocer el tiempo de retención hidráulico se usa la siguiente ecuación:

$$TRH_C = \frac{V_C}{Q_m} \quad (100)$$

Donde:

$TRH_C$ : Tiempo de retención hidráulico del clarificador.

Los resultados obtenidos para el clarificador V-402 se presentan en la tabla E.46.

Tabla E.46. Volumen de diseño y TRH del clarificador V-402. Elaboración propia.

Concepto	Símbolo	Valor
Flujo salida tanque de lodos [m <sup>3</sup> /día]	$Q_m$	1001.86
Carga hidráulica [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *día)]	$CH$	40.00
Área superficial [m <sup>2</sup> ]	$A_s$	25.05
Diámetro [m]	$D$	6.00
Recalculer $A_s$ [m <sup>2</sup> ]	$A_s$	28.27
Altura [m]	$h$	4.00
Volumen [m <sup>3</sup> ]	$V_C$	113.10
Tiempo de retención hidráulico [día]	$TRH_C$	0.11
Tiempo de retención hidráulico [h]	$TRH_C$	2.71

## 11. Anexo F. Consideraciones simulación de costos en Aspen Capital Cost.

En esta sección se describen los casos especiales para realizar la simulación de costos en el programa Aspen Capital Cost.

### 11.1 Aislamiento de biodigestor V-201.

La simulación del costo de aislamiento para el biodigestor V-201 a la temperatura de operación de 55 °C da como resultado un costo de cero dólares. El costo del aislamiento térmico se calcula manualmente con las dimensiones del equipo obtenidas del biodigestor y utilizando un grosor de 15 cm de aislante de acuerdo con Nachwachsende (2010), se supone el biodigestor es un cilindro. El cálculo realizado es el siguiente:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} \quad (101)$$

Donde:

$V_a$ : Volumen del aislante.

$V_{a1}$ : Volumen del aislante paredes del biodigestor.

$V_{a2}$ : Volumen del aislante tapas del biodigestor.

$$V_{a1} = \pi * d * h * w \quad (102)$$

$$V_{a2} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * 2 * w \quad (103)$$

Donde:

$d$ : Diámetro del biodigestor.

$h$ : Altura del biodigestor.

$w$ : Grosor del aislante.

Utilizando un valor de 220 kg/m<sup>3</sup> como densidad de la fibra de vidrio (Aislamiento y estanqueidad Erika, 2019) y un costo en pesos mexicanos de 17 \$/kg de fibra de vidrio (Shenzhen Yataida High-Tech Co., Ltd., 2021) se calcula el costo del aislante con la siguiente expresión.

$$C_a = V_a * \rho_a * C \quad (104)$$

Donde:

$C_a$ : Costo del aislante.

$\rho_a$ : Densidad del aislante.

$C$ : Costo de fibra de vidrio.

Conociendo el costo estimado del aislante se aumentó la temperatura de operación del biodigestor en la simulación de Aspen Capital Cost de 55°C a 65°C. La temperatura de 65°C es seleccionada ya que es la temperatura que arroja un costo de aislante en el rango del costo calculado. El costo de aislante calculado es de 126,973 dólares mientras que el costo obtenido en la simulación es de

132,836 dólares, cabe mencionar no se modifican los demás costos asociados al biodigestor en la simulación utilizando la temperatura de 55°C.

### 11.2 Gasómetro V-202.

Aspen Capital Cost no tiene el equipo gasómetro para ser simulado en el software, para simular el gasómetro se utiliza el equipo “Plastic storage tank” donde se ajusta el costo del equipo al 279% y el costo de la instalación (mano de obra, tuberías, civil, acero, instrumentación, eléctrico, aislamiento y pintura) al 128%, los porcentajes aplicados se obtienen de la siguiente forma.

Se calcula el costo del gasómetro utilizando la regla de las seis décimas en la tabla F.1 se presentan los resultados.

Tabla F.1. Costo del gasómetro (únicamente el equipo). Datos de gasómetro obtenidos de Carrasco Allendes (2015).

<b>Capacidad gasómetro [m<sup>3</sup>]</b>	1,520
<b>Precio [USD]</b>	\$ 67,891.00
<b>Capacidad gasómetro requerido [m<sup>3</sup>]</b>	6,881
<b>Costo estimado [USD]</b>	\$ 167,995.24

Se corren varias simulaciones del equipo “Plastic storage tank” cambiando el volumen del tanque hasta el máximo permitido por Aspen Capital Cost. Para cada corrida se obtiene el costo del equipo y el costo total.

El costo del equipo obtenido de Aspen Capital Cost con el máximo volumen permitido por el software es comparado con el costo estimado del gasómetro en la tabla F.1, el porcentaje de ajuste para el costo del equipo se obtiene con la siguiente expresión

$$\% \text{ Ajuste costo equipo} = \frac{\text{Costo estimado regla seis décimas}}{\text{Costo estimado por Aspen Capital Cost}} \quad (105)$$

Se calcula la diferencia entre el costo total y el costo del equipo para obtener el costo de instalación para cada simulación realizada en el software. El costo de instalación obtenido se gráfica contra el costo del equipo y se obtiene una línea de tendencia presentada en la figura F.1. Utilizando la línea de tendencia se calcula el costo de instalación que corresponde al costo del equipo estimado con la regla de seis décimas, el porcentaje de ajuste para la instalación se obtienen con la siguiente expresión.

$$\% \text{ Ajuste costo instalación} = \frac{\text{Costo estimado con línea de tendencia}}{\text{Costo estimado por Aspen Capital Cost}} \quad (106)$$

Los datos de las simulaciones realizadas para el equipo “Plastic storage tank” se presentan en la tabla F.2 y su gráfica correspondiente en la figura F.1.

Tabla F.2. Resultados de simulación para el "Plastic storage tank". Elaboración propia.

Volumen [m <sup>3</sup> ]	Costo equipo [USD]	Costo total [USD]	Costo instalación [USD]
113	\$ 60,400.00	\$ 163,500.00	\$ 103,100.00
105	\$ 58,000.00	\$ 160,700.00	\$ 102,700.00
100	\$ 56,500.00	\$ 158,000.00	\$ 101,500.00
90	\$ 53,300.00	\$ 154,400.00	\$ 101,100.00
80	\$ 49,900.00	\$ 150,600.00	\$ 100,700.00
70	\$ 46,400.00	\$ 146,700.00	\$ 100,300.00
60	\$ 42,600.00	\$ 141,300.00	\$ 98,700.00
50	\$ 38,500.00	\$ 135,900.00	\$ 97,400.00
40	\$ 34,100.00	\$ 130,900.00	\$ 96,800.00
30	\$ 29,100.00	\$ 123,600.00	\$ 94,500.00
20	\$ 23,200.00	\$ 116,200.00	\$ 93,000.00
10	\$ 15,900.00	\$ 103,800.00	\$ 87,900.00

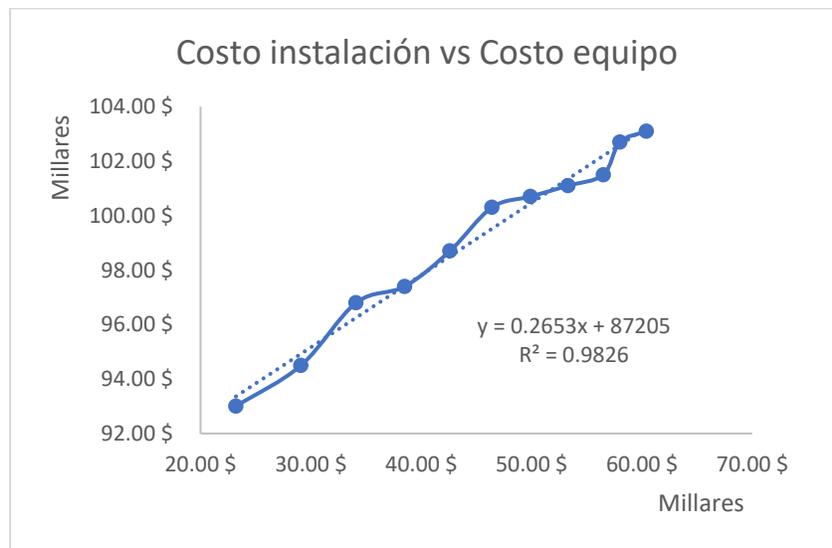


Figura F.1. Costo instalado vs Costo del equipo. Elaboración propia.

Los ajustes realizados a la simulación para el gasómetro se presentan en la tabla F.3.

Tabla F.3. Ajustes de porcentajes para la simulación del gasómetro. Elaboración propia.

Costo equipo estimado con regla de seis décimas [USD]	\$ 167,995.24
Costo de equipo estimado con Aspen Capital Cost [USD]	\$ 60,400.00
% ajuste de equipo	278%
Costo instalación estimado con línea de tendencia [USD]	\$ 131,774.14

<b>Costo instalación estimado con Aspen Capital Cost [USD]</b>	\$ 103,100.00
<b>% Ajuste instalación</b>	128%

### 11.3 Decantador centrífugo M-401.

El decantador centrífugo es simulado con las dimensiones del equipo especificadas por Wuxi Shuhang Machinery Science & Technology Co., Ltd. (2020) y que corresponden al flujo volumétrico de digestato a procesar.

### 11.4 Sistemas de control.

La simulación de los costos del sistema incluye la carga de 3 sistemas a la simulación: El sistema de control distribuido, el sistema de paro de emergencia y sistema de gas y fuego. El sistema de control distribuido y el sistema de paro de emergencia se aplica a todas las áreas del proyecto, el sistema de gas y fuego solo se aplica a las áreas de tratamiento de biogás, cogeneración y refrigeración por absorción LiBr/H<sub>2</sub>O.

## 12. Anexo G. Pronóstico de INPC.

En la tabla G.1 se presentan los datos y proyecciones de INPC e inflación utilizados para actualizar los costos y los ingresos en la evaluación económica. En las figuras G.1, G.2 y G.3 se muestran los gráficos de los datos de INPC con sus correspondientes líneas de tendencia utilizadas para la proyección.

Tabla G.1. Datos y pronósticos de INPC e inflación. Datos obtenidos de INEGI (2019).

Meses	índices generales	Inflación general	Subíndices servicios	Inflación servicios	Subíndices agropecuarios	Inflación agropecuarios
Datos INPC e inflación						
2000	48.3077		52.9416		38.8774	
2001	50.4349	4.40%	56.6802	7.06%	39.4036	1.35%
2002	53.3099	5.70%	60.2818	6.35%	42.8108	8.65%
2003	55.4298	3.98%	63.2708	4.96%	44.3740	3.65%
2004	58.3071	5.19%	65.7790	3.96%	48.8592	10.11%
2005	60.2503	3.33%	68.1765	3.64%	48.7703	-0.18%
2006	62.6924	4.05%	70.7923	3.84%	52.8187	8.30%
2007	65.0491	3.76%	73.1485	3.33%	54.6259	3.42%
2008	69.2956	6.53%	76.5976	4.72%	60.9776	11.63%
2009	71.7719	3.57%	78.8485	2.94%	61.9898	1.66%
2010	74.9310	4.40%	81.4957	3.36%	66.3055	6.96%
2011	77.7924	3.82%	83.4484	2.40%	68.7803	3.73%
2012	80.5682	3.57%	84.4084	1.15%	75.0958	9.18%
2013	83.7701	3.97%	87.3969	3.54%	80.1023	6.67%
2014	87.1890	4.08%	90.0456	3.03%	87.0014	8.61%
2015	89.0468	2.13%	91.9096	2.07%	88.4975	1.72%
2016	92.0390	3.36%	94.5930	2.92%	92.1732	4.15%
2017	98.2729	6.77%	98.1519	3.76%	101.1614	9.75%
2018	103.0200	4.83%	101.5604	3.47%	108.3049	7.06%
2019	105.9340	2.83%	105.2526	3.64%	108.2690	-0.03%
Pronóstico de INPC e inflación						
2020	111.0206765	4.80%	110.24537	4.74%	117.8746	8.87%
2021	115.6439944	4.16%	113.9669528	3.38%	124.7761	5.85%
2022	120.4598	4.16%	117.8142	3.38%	132.0817	5.85%
2023	125.4762	4.16%	121.7913	3.38%	139.8151	5.85%
2024	130.7015	4.16%	125.9026	3.38%	148.0013	5.85%
2025	136.1445	4.16%	130.1527	3.38%	156.6668	5.85%
2026	141.8140	4.16%	134.5463	3.38%	165.8396	5.85%
2027	147.7197	4.16%	139.0882	3.38%	175.5495	5.85%
2028	153.8713	4.16%	143.7835	3.38%	185.8279	5.85%
2029	160.2791	4.16%	148.6372	3.38%	196.7081	5.85%

2030	166.9537	4.16%	153.6548	3.38%	208.2254	5.85%
2031	173.9063	4.16%	158.8418	3.38%	220.4170	5.85%
2032	181.1484	4.16%	164.2038	3.38%	233.3224	5.85%
2033	188.6921	4.16%	169.7469	3.38%	246.9834	5.85%
2034	196.5499	4.16%	175.4771	3.38%	261.4442	5.85%
2035	204.7350	4.16%	181.4007	3.38%	276.7518	5.85%
2036	213.2609	4.16%	187.5243	3.38%	292.9556	5.85%
2037	222.1419	4.16%	193.8546	3.38%	310.1081	5.85%
2038	231.3927	4.16%	200.3986	3.38%	328.2649	5.85%
2039	241.0288	4.16%	207.1635	3.38%	347.4848	5.85%
2040	251.0662	4.16%	214.1568	3.38%	367.8301	5.85%
2041	261.5215	4.16%	221.3862	3.38%	389.3665	5.85%
2042	272.4122	4.16%	228.8596	3.38%	412.1639	5.85%

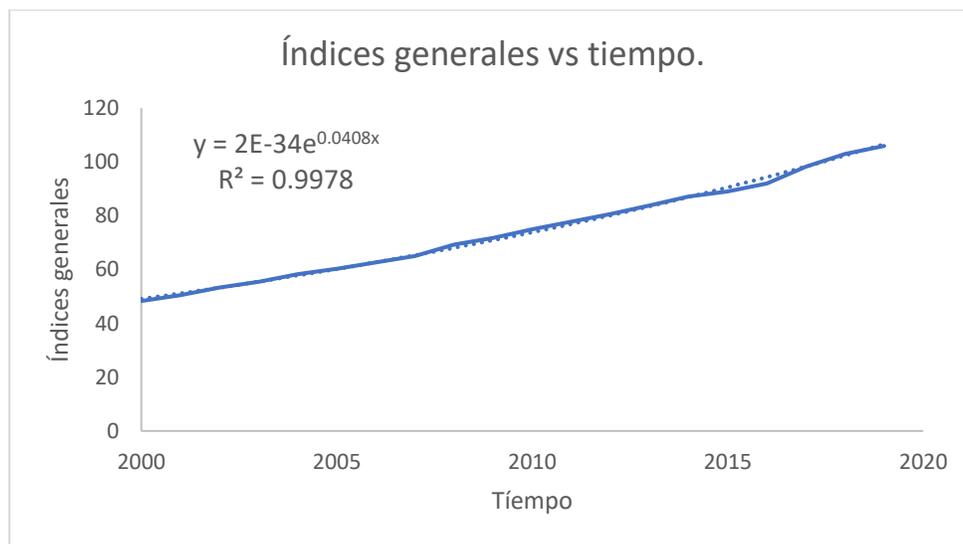


Figura G.1. Gráfica y línea de tendencia para índices generales. Datos obtenidos de INEGI (2019).

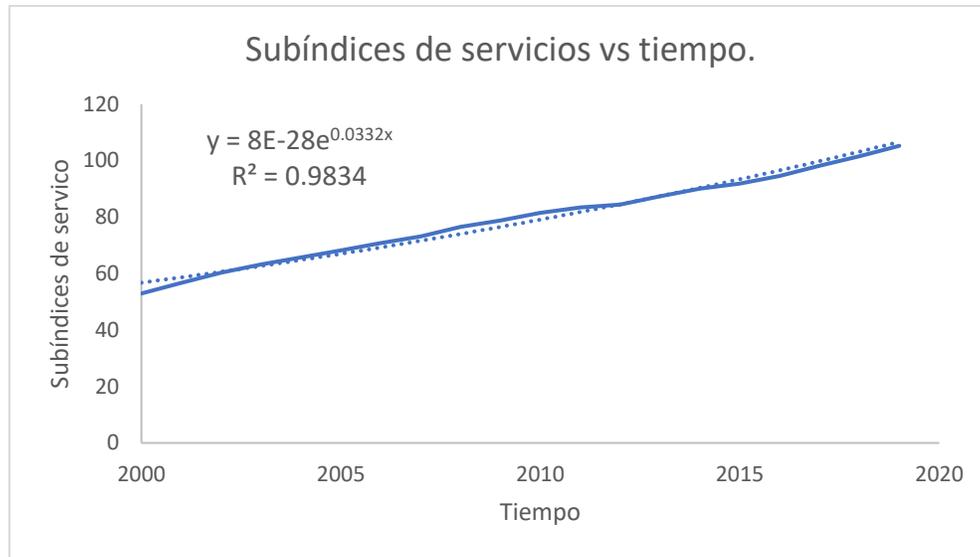


Figura G.2. Gráfica y línea de tendencia para subíndices de servicios. Datos obtenidos de INEGI (2019).

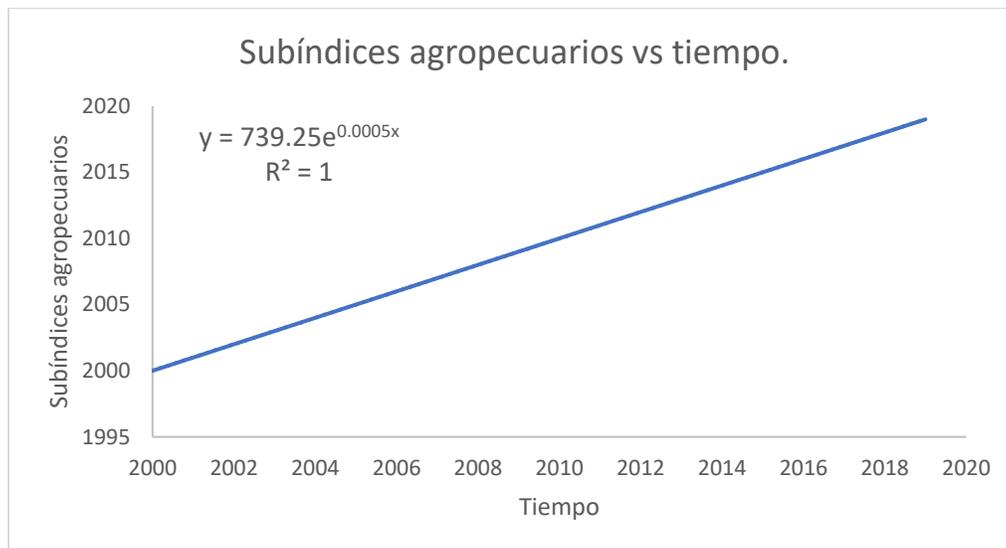


Figura G.3. Gráfica y línea de tendencia para subíndices de agropecuarios. Datos obtenidos de INEGI (2019).

### 13. Referencias

- A. Sembera, J., J. Meier, E., & M. Waliczek, T. (2018). Composting as alternative management strategy for sargassum drifts on coastlines. *Hort Technology*, 1-5. doi:10.21273/HORTTECH03836-17
- Abdulla, N., Senem, O. C., Ayah, A., Hani, A. Q., & Kerstin, K. (2020). Operational Parameters of Biogas Plants: A Review and Evaluation Study. *Energies*, 1-27. doi:doi:10.3390/en13153761
- ABSORSISTEM. (s.f.). *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente*. Obtenido de Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente: <https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua>
- Agricultura moderna. (26 de Abril de 2018). *Hablemos del campo*. Obtenido de Campo mexicano: Estados con mayor actividad agrícola: <https://www.hablemosdelcampo.com/campo-mexicano-estados-con-mayor-actividad-agricola/>
- Aislamiento y estanqueidad Erika . (2019). *Aislamiento y estanqueidad Erika* . Obtenido de Aislamiento térmico: <http://www.erica.es/web/aislamiento-termico/>
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). Biogas handbook. En T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, & R. Janssen, *Al Seadi, Teodorita; Rutz, Dominik; Prassl, Heinz; Köttner, Michael; Finsterwalder, Tobia; Volk, Silke; Janssen, Rainer*; (págs. 16-28). Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Alaswad, A., Dassisti, M., Prescott, T., & Olabi, A. (2015). Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1146-1460. doi:10.1016/j.rser.2015.07.058
- Albarran, D. (12 de Mayo de 2020). *Greenpeace*. Obtenido de Los costos de una industria muy puerca en la península de Yucatán: <https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/8374/los-costos-de-una-industria-muy-puerca-en-la-peninsula-de-yucatan/>
- Aldana Aranda, D. (2020). México ante el sargazo. *Ciencia*, 71(4), 6-7.
- Almasi, A. (29 de Julio de 2016). *Processing solutions for the process industries*. Obtenido de Processing solutions for the process industries: <https://www.processingmagazine.com/home/article/15586711/steam-turbine-flow-operation>
- Almenara Juste, C. (s.f.). *Economipedia*. Obtenido de Modelo de valoración de activos financieros: <https://economipedia.com/definiciones/modelo-valoracion-activos-financieros-capm.html>
- Alston. (2012). Heat recovery steam generators for combined cycle power plants. En Alston, *Heat recovery steam generators for combined cycle power plants* (pág. 6). Suiza.

- Álvarez de la Puente, J. (2010). Manual de compostaje para agricultura ecológica. En J. Álvarez de la Puente, *Manual de compostaje para agricultura ecológica* (págs. 6,7,9,10,14,15,16,17,18). Andalucía, España: Consejería de agricultura y pesca.
- Álvarez Sánchez, F. A. (2017). Técnicas para evaluar financieramente proyectos de inversión. En F. A. Álvarez Sánchez, *Técnicas para evaluar financieramente proyectos de inversión* (págs. 11, 12). Cali: ICESI.
- Ambientum. (s.f.). *Usos y mercados de compost*. Obtenido de [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/usos\\_y\\_mercado\\_de\\_l\\_compost.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/usos_y_mercado_de_l_compost.asp)
- Amigos de la tierra. (2009). *Usos del compost*. Madrid.
- Anaya Durand, A., Barragán Acevedo, R., & Vergara Vega, A. (2015). Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos. En A. Anaya Durand, R. Barragán Acevedo, & A. Vergara Vega, *Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos* (págs. 5-14). México: UNAM.
- Anaya Durand, A., Barragán Acevedo, R., & Vergara Vega, A. (2015). Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos. En A. Anaya Durand, R. Barragán Acevedo, & A. Vergara Vega, *Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos* (págs. 5-14, 42). México: UNAM.
- Aponte, R., Muñoz, F., & Álzate, L. (2016). La evaluación financiera de proyectos y su aporte en la generación de valor corporativo. *Ciencia y poder aéreo*, 144-155.
- Apumayta Suárez, E. (2019). Actividad antioxidante y determinación del contenido de fucoidano, compuestos fenolicos y flavonoides en extractos de macroalga parda. En E. Apumayta Suárez, *Actividad antioxidante y determinación del contenido de fucoidano, compuestos fenolicos y flavonoides en extractos de macroalga parda* (pág. 8). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Arellano, L., Dorado, A. D., Fortuny, M., G. D., Gamisans, X., González Sánchez, A., . . . Sierra, H. (2017). Purificación y usos del biogás. En L. Arellano, A. D. Dorado, M. Fortuny, G. D., X. Gamisans, A. González Sánchez, . . . H. Sierra, *Purificación y usos del biogás* (págs. 39-85). Barcelona: Universidad Atonoma de Barcelona.
- Arellano, L., Dorado, D. A., Fortuny, M., Gaminsas, X., González, A., Hernández, S., . . . Sierra, H. (2017). Purificación y usos del biogás. En L. Arellano, D. A. Dorado, M. Fortuny, X. Gaminsas, A. González, S. Hernández, . . . H. Sierra, *Purificación y usos del biogás* (págs. 27, 60). Barcelona, España: Universidad Autonoma de Barcelona.
- Arnabat, I. (17 de Agosto de 2018). *calor y frio*. Obtenido de calor y frio: <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html>
- Arroyo Osorno, J. A., Aguerrebere Salido, R., & Torres Vargas, G. (2008). Costo de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008. En J. A. Arroyo Osorno, R. Aguerrebere Salido, & G. Torres Vargas, *Costo de operación base de los vehículos*

- representativos del transporte interurbano 2008* (págs. 69-75). Querétaro: Secretaría de comunicaciones y transportes.
- Association for the advancement of cost engineering. (2020). *Cost estimate classification system-as applied in engineering, procurement and construction for the process industries*. AACE.
- Avila Villegas, C. A., & Olvera Granados, L. Á. (2006). Estudio de factibilidad para la fabricación de abono fermentado de tipo bokashi. En C. A. Avila Villegas, & L. Á. Olvera Granados, *Estudio de factibilidad para la fabricación de abono fermentado de tipo bokashi* (pág. 30). Pachuca: IPN.
- Ballantyne, R., Ballantine, W., Knapke, M., Neumann, D., & Rossin, J. (2015). *United States Patente nº US 20150209717 A1*.
- Banxico. (9 de Septiembre de 2020). *Sistema de información económica*. Obtenido de Bolsa mexicana de valores, índices de precios y cotizaciones (IPC): <https://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadroAnalitico&idCuadro=CA54&sector=7&locale=es>
- Banxico. (9 de Noviembre de 2020). *Sistema de información económica*. Obtenido de Valores Gubernamentales: <https://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF107&sector=22&locale=es>
- Banxico. (3 de Abril de 2021). *Sistema de información económica*. Obtenido de Mercado cambiario (Tipo de cambio): Evaluación financiera de proyectos de inversión
- Barragán Escandón, A., Olmedo Ruiz, J. M., Currillo Tigre, J. D., & Zalamea León, E. (2020). Assesment of power generation using biogas from landfills in an equatorial tropical context. *Sustainability*, 1-18.
- Basilio, L. (23 de Junio de 2017). *Oil & Gas IQ*. Obtenido de Managing your offshore project: Front-end Loading and cost accuracy: <https://www.oilandgasiq.com/strategy-management-and-information/articles/managing-your-offshore-project-front-end-loading>
- Bastiaan, V., Willemijn, F., Lukas, d., & Willem, B. (2016). Coastal seaweed solution. En B. Vos, W. Foursoff, L. Bruijn, & W. Bruijn, *Coastal seaweed solution* (págs. 24, 36, 42, 43, 44, 45, 62, 63, 64, 65, 66). Netherland: Tudelft.
- Bastiaan, V., Willemijn, F., Lukas, d., & Willem, B. (2016). Coastal seaweed solution. En B. Vos, W. Foursoff, L. Bruijn, & W. Bruijn, *Coastal seaweed solution* (págs. 24, 26, 36, 42, 43, 44, 45, 62, 63, 64, 65, 66. 120). Netherland: Tudelft.
- Benítez Arellano, M., & Sosa Alcaraz, M. (2017). Situación actual del sistema producto coco en Yucatán, desde una perspectiva de la sustentabilidad. *ECORFAN*, 93-105.
- Bernal Calderón, P., Alburquerque Méndez, J. A., Bustamante Muñoz, A., & Clemete Carrillo, R. (2011). Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización. En P. Bernal Calderón, J. A. Alburquerque Méndez, A. Bustamante Muñoz, & R. Clemete Carrillo,

- Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización* (pág. 14). Murcia: Fondo Europeo de Desarrollo Regional.
- Biggeri, M., & Soledad, A. (2018). Desarrollo de estimados de costos de un proyecto. *Petrotecnia*, 58-63.
- BLS. (2020). *Bureau of labor statics*. Obtenido de (Lawrence, 2007): <https://www.bls.gov/>
- Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., & Rossi, C. (2017). Biomass: An overview. En C. Bonechi, M. Consumi, A. Donati, G. Leone, A. Magnani, G. Tamasi, & C. Rossi, *Biomass: An overview* (pág. 14). Siena: University of Siena.
- Borbolla, D. (2019 de Agosto de 2019). *Construcción de barcazas sargaceras lleva 70% de avance*. Obtenido de tv aztecanoticias: <https://www.tvazteca.com/aztecanoticias/seguridad-y-justicia/notas/construccion-de-barcazas-sargaceras-lleva-70-de-avance>
- Breeze, P. (2005). Power generation technologies. En P. Breeze, *Power generation technologies* (págs. 62-74). Elsevier.
- Brown, T. L., LeMay, E., Bursten, B., & Burdge, J. (2004). Química. La ciencia central. En T. L. Brown, E. LeMay, B. Bursten, & J. Burdge, *Química. La ciencia central*. (M. G. Tujano, Trad., Novena ed., págs. 138, 621). México, México: PEARSON EDUCACIÓN. Recuperado el 27 de Diciembre de 2019
- Bruijstems, Beuman, Molen, Rijke, Cluodt, Camp, & Bleuanus. (2008). Biogas composition and engine performance, including database and biogas property model. En Bruijstems, Beuman, Molen, Rijke, Cluodt, Camp, & Bleuanus, *Biogas composition and engine performance, including database and biogas property model* (págs. 4,5). Stockholm: BIOGASMAX.
- Caballero Vázquez, A., Acosta González, G., & Hernández Zepeda, C. (2020). El sargazo, un fenómeno complejo. *Ciencia*, 71(4), 14-19.
- Camara de diputados del H. Congreso de la Unión. (2019). Ley de impuesto sobre la renta. En *Ley de impuesto sobre la renta* (págs. 56-58). México: Camara de diputados del H. Congreso de la Unión.
- Cappelli, Gigli, Romagnoli, Simoni, Blumberga, Palermo, & Guerriero. (2015). Co-digestion of macroalgae for biogas production: an LCA-based environmental evaluation. *Energy Procedia*, 3-10. doi:10.1016/j.egypro.2015.06.002
- Carrasco Allendes, J. L. (2015). Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos. En J. L. Carrasco Allendes, *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos* (pág. 171). Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Carrillo, L., & Sheinbaum Pardo, J. (2020). Sargazo en movimiento. *Ciencia*, 20-27.

- CDRSSA. (15 de Enero de 2019). *Fertilizantes*. Obtenido de Notas sobre fertilizantes: [http://www.cedrssa.gob.mx/post\\_n-fertilizantes-n.htm#:~:text=%2D%20De%20acuerdo%20a%20informaci%C3%B3n%20del,%2C%20el%2022.2%25%20son%20fosfatados](http://www.cedrssa.gob.mx/post_n-fertilizantes-n.htm#:~:text=%2D%20De%20acuerdo%20a%20informaci%C3%B3n%20del,%2C%20el%2022.2%25%20son%20fosfatados)
- CDRSSA. (2020). *La producción y el comercio de los biocombustibles en México y en el mundo*. Ciudad de México: CEDRSSA.
- CENACE. (2018). *Informe de tecnología de generación de referencia*. CENACE.
- Cervantes, E. (2019 de Agosto de 2019). *Reforma*. Obtenido de Construye Marina 4 barcos contra sargazo: [https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?\\_\\_rval=1&urlredirect=https://www.reforma.com/construye-marina-4-barcos-contrasargazo/ar1750120?referer=-7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783b786d3a--](https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?__rval=1&urlredirect=https://www.reforma.com/construye-marina-4-barcos-contrasargazo/ar1750120?referer=-7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783b786d3a--)
- Chamorro, S., & Vidal, G. (2015). Tecnologías de tratamiento de agua mediante sistemas de lodos activados. Observación microscópica de organismos indicadores. En S. Chamorro, & G. Vidal, *Tecnologías de tratamiento de agua mediante sistemas de lodos activados. Observación microscópica de organismos indicadores* (pág. 11). Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Chen, H., Zhou, D., Luo, G., Zhang, S., & Chen, J. (2015). Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 427-437. doi:10.1016/j.rser.2015.03.086
- Ciubota-Rosie, C., Gavrilescu, M., & Macoveanu, M. (2008). Biomass-An important renewable source of energy in Romani. *Environmental engineering and management journal*, 7, 559-568.
- Colombo, C., & Rodríguez Cuevas, A. (2020). *Generación de biogás a partir de diferentes residuos orgánicos: Estudio de caso de biorremediación y desarrollo de comunidades en Argentina y República Dominicana*. LACCEI.
- Comisión Nacional Forestal. (3 de mayo de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Oaxaca, tercer lugar nacional en producción maderable: <https://www.gob.mx/conafor/prensa/oaxaca-tercer-lugar-nacional-en-produccion-maderable>
- CONAGUA. (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida. En C. n. agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida*. (págs. 40-88). México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida. En C. n. agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño*

- de plantas de tratamiento de aguas municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida.* (págs. 40-88, 179-183). México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. En C. n. agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales.* (págs. 47, 48, 51). México: CONAGUA.
- Consejería de economía, innovación y ciencia. (2011). *Estudio básico del biogás.* Andalucía: Agencia Andaluza de la energía.
- Costa Veracruz. (20 de Agosto de 2019). *Construyen en Coatzacoalcos buques recolectores de sargazo.* Obtenido de <https://costaveracruz.net/2019/08/20/construyen-en-coatzacoalcos-buques-recolectores-de-sargazo/>
- Couper, J., Penny, R., Fair, J., & Walas, S. (2010). Chemical Process Equipment. En C. James, P. Roy, F. James, & W. Stanley, *Chemical Process Equipment* (Segunda ed., págs. 366, 373). Burlington,, EUA: Butterworth-Heinemann. Recuperado el 11 de Diciembre de 2019
- CRE. (2020). *Comisión reguladora de energía.* Obtenido de índices de referencia de precios de gas natural: <https://www.cre.gob.mx//IPGN/index.html>
- Crespo Benito, E., & Vilorio, G. (2007). Análisis de inversiones. En E. Crespo Benito, & G. Vilorio, *Análisis de inversiones* (págs. 11, 15). EOI.
- Damodaran. (05 de Enero de 2021). *Damodaran online.* Obtenido de Data current: [http://people.stern.nyu.edu/adamodar/New\\_Home\\_Page/datacurrent.html](http://people.stern.nyu.edu/adamodar/New_Home_Page/datacurrent.html)
- DataMéxico. (2019). *Fabricación de fertilizantes, pesticidas y otros agroquímicos.* Obtenido de <https://datamexico.org/es/profile/industry/fabricacion-de-fertilizantes-pesticidas-y-otros-agroquimicos>
- Deng, C., Lin, R., Kang, X., Wu, B., O’Shea, R., & D.Murphy, J. (2020). Improving gaseous biofuel yield from seaweed through a cascading circular bioenergy system integrating anaerobic digestion and pyrolysis. *Elsevier.*
- Department of housing and public works . (2008). *Forecasting escalation in building cost, calculating, documenting and reviewing allowances.* Brisbane: Queensland government.
- Desrochers, A., Cox, S.-A., A. Oxenford, H., & Tussenbroek, B. (2020). Sargassum Uses Guide: A resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers. En A. Desrochers, S.-A. Cox, H. A. Oxenford, & B. Tussenbroek, *Sargassum Uses Guide: A resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers* (págs. 3,9,10,11,42,43,44,45,54,71-78). Barbados: FAO & CERMES.
- Díaz Castillo, D. V., López Ruiz, H. A., & Munguía Martínez, K. J. (2018). Mercadeo. Comercio la detalle y al mayoreo. En D. V. Díaz Castillo, H. A. López Ruiz, & K. J. Munguía Martínez, *Mercadeo. Comercio la detalle y al mayoreo* (pág. 4). Managua: UNAN-MANAGUA.

- Díaz, Y., & Camacaro, C. (Junio de 2011). *Capital de trabajo*. Obtenido de <https://capitaldetrabajo.wordpress.com/2011/06/27/capital-de-trabajo/#:~:text=M%C3%89TODOS%20DE%20CALCULO%20DEL%20CAPITAL,producto%2C%20el%20monto%20recuperado%20se>
- Dirección general de normas. (2018). *NMX-AA-180-SCFI-2018*. México: Secretaría de economía.
- DJ & CJM. (2020). *Sargassum monitoring*. Obtenido de 2020 Sargassum: <http://sargassummonitoring.com/2019-sargassum-sargasses-sargazo-2/>
- DL Morris, G. (1 de Noviembre de 2013). *Risk&insurance*. Obtenido de Risk in biomass: <https://riskandinsurance.com/energys-quiet-power/>
- Dreckmann, K., & Sentíes, A. (2013). Las arribazones de algas marinas en el caribe mexicano. Evento biológico natural o basura en las playas. *Biodiversitas*, 7-11.
- E. Martínez, C., S. Ledesma, J., & O. Russo, A. (2014). Modelos de cálculos de las betas a aplicar en el Capital Asset Pricing Model: el caso de Argentina. *Estudios Gerenciales*, 200-208.
- Eastmond, A., Herrera, J. L., & L., M. (1999). Los impactos potenciales de la biotecnología vegetal aplicada al henequén en Yucatán. En A. Eastmond, J. L. Herrera, & M. L., *Los impactos potenciales de la biotecnología vegetal aplicada al henequén en Yucatán* (págs. 5, 6). Mérida.
- Ezurike, B., Osazuka, O., Okoronkwo, C., & Okoji, K. (19 de Julio de 2018). Design, construction and performance evaluation of a flat screen hammer mill machine. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 1-4. doi:10.1080/20421338.2018.1491675
- Fajardo Vaca, L., Girón Guerrero, M. F., Vásquez Fajardo, C. E., Fajardo Vaca, L. A., Zúñiga Santillan, X. L., Solis Granda, L. E., & Pérez Salazar, J. A. (2019). Valor actual neto y tasa interna de retorno como parámetros de evaluación de las inversiones. *Investigación operacional*, 469-474.
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. En FAO, *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores* (págs. 1-14). Buenos Aires: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).
- Farchverband Biogas. (2018). Digestate as fertilizer. En D. Wilken, S. Rauh, R. Fruhner-Weib, F. Strippler, G. Bontempo, A. Kramer, . . . J. Dahlin, *Digestate as fertilizer* (págs. 17, 18). Freising, Alemania: Farchverband Biogas.
- Feedmachinery. (2019). *Feedmachinery.com*. Obtenido de Feedmachinery.com: [https://www.feedmachinery.com/glossary/equipment/hammer\\_mill/](https://www.feedmachinery.com/glossary/equipment/hammer_mill/)
- Fernández Díaz, C. (2018). *Polisacáridos procedentes de la macroalga Ulva ohnoi como recurso funcional en acuicultura*. Cádiz: IFAPA.
- Fernández Rivera, C. (2017). Características termofísicas de mezclas de algas con bentonita y disoluciones salinas para usos en centros de talasoterapia. En C. Fernández Rivera,

- Características termofísicas de mezclas de algas con bentonita y disoluciones salinas para usos en centros de talasoterapia* (pág. 143). Vigo: Universidad de Vigo.
- Fernández Sé, S. (2010). Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro. En S. Fernández Sé, *Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro* (pág. 15). Barcelona: UAB.
- Fernández, F., Boluda, C. J., Olivera, J., Guillermo, L. A., Gómez, B., Echavarría, E., & Mendis Gómez, A. (2017). Análisis elemental prospectivo de la biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante el 2015. *Centro Azúcar*, 44(1), 11-22.
- Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, S.A. de C.V. (2020). *Tarifa máxima de flete de los factores de cobro para el servicio de carga regular*. Istmo de Tehuantepec.
- Fichtner. (2005). Anexo: Tecnologías de manejo de residuos sólidos. En Fichtner, *Anexo: Tecnologías de manejo de residuos sólidos* (pág. 58). Montevideo, Uruguay: LKSUR.
- Fondear. (2009). *Fondear*. Obtenido de El rendimiento de un motor: [http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores\\_Helices/Motor\\_Rendimiento/Motor\\_Rendimiento.htm#:~:text=En%20t%C3%A9rminos%20generales%20los%20motores,0%2C4%20litros%20el%20gasolina](http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores_Helices/Motor_Rendimiento/Motor_Rendimiento.htm#:~:text=En%20t%C3%A9rminos%20generales%20los%20motores,0%2C4%20litros%20el%20gasolina).
- Fraile, D. (2008). Cogeneración: Aspectos tecnológicos. En D. Fraile, *Cogeneración: Aspectos tecnológicos* (págs. 12-24). EOI.
- Fregoso Madueño, J., Goche Télles, J., Rutiaga Quiñones, J., González Laredo, R., Bocanegra Salazar, M., & Chávez Simental, J. (2017). Usos alternativos de la industria del aserrío. *Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 243-260. doi:10.5154/r.rchscfa.2016.06.040
- Galiana, P. (9 de Noviembre de 2020). *IEBS*. Obtenido de Descubre las 5 fuerzas de Porter y cómo aprovecharlas: <https://www.iebschool.com/blog/las-5-fuerzas-porter-marketing-digital/>
- Garcés Molina, A. M., Berrio Roa, L., Ruiz Alzate, S., Serna de León, J. G., & Builes Arango, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista lasallista de investigación*, 1(1), 66-71.
- García Aguilar, J., Galarza Torres, S., & Altamirano Salazar, A. (2017). Importancia de la administración eficiente del capital de trabajo en las Pyemes. *Revista ciencia UNEMI*, 30-39.
- García Salazar, J., Borja Bravo, M., & Rodríguez Licea, G. (2018). Consumo de fertilizantes en el sector agrícola de México: Un estudio sobre los factores que afectan la tasa de adopción. *Interciencia*, 505-510.
- García Sterling, M., Vargas Talero, M., Díaz, D. C., Aragón Martínez, M., & Humberto Sánchez, F. (2018). Estudio de viabilidad para la producción y comercialización de abono orgánico. En M. A. García Sterling, M. d. Vargas Talero, D. C. Díaz, M. J. Aragón Martínez, & F. Humberto Sánchez, *Estudio de viabilidad para la producción y comercialización de abono orgánico* (pág. 10). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

- García, L. (22 de Octubre de 2019). *Ciencia UNAM*. Obtenido de ¿Qué sabemos del sargazo?: <http://ciencia.unam.mx/leer/917/-que-sabemos-del-sargazo-#:~:text=Actualmente%2C%20investigadores%20de%20Estados%20Unidos,estudian%20el%20origen%2C%20la%20gen%C3%A9tica%2C>
- Gaucín, D. (10 de Febrero de 2016). *El economista*. Obtenido de El mercado de los fertilizantes: <https://www.economista.com.mx/opinion/El-mercado-de-los-fertilizantes-I-20160210-0004.html>
- Gayosso, R. S., Borges, G. L., Villanueva, C. E., Estrada, B. M., & Garruña, R. (2018). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, 52(4), 639-652.
- Gayosso, R. S., Borges, G. L., Villanueva, C. E., Estrada, B. M., & Garruña, R. (2018). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, 52(4), 639-652.
- GCMA. (2020). *GCMA*. Obtenido de <https://gcma.com.mx/mexico-solo-produce-el-35-de-los-fertilizantes-que-utiliza/>
- Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Soste. (2016). Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje. En G. d. Soste, *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje* (pág. 38). Catalunya: Agencia de Residus de Catalunya.
- Ghorbani, S. (16 de Abril de 2017). *Project control academy*. Obtenido de How cost contingency is calculated?: <https://www.projectcontrolacademy.com/cost-contingency-calculation/>
- González Mancera, G., Tehuacanero, S., & Chavira, E. (2019). Metallic pollutants in Sargassum of Cancún, Quintana Roo, México coast. *Micros. Microanal*, 1110-1111. doi:10.1017/S1431927619006287
- González Sánchez, M., Pérez Fabiel, S., Wong Villareal, A., Bello Mendoza, R., & Yañez Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de microbiología*, 229-235. doi:10.1016/j.ram.2015.05.003
- Google. (16 de Marzo de 2021). *Google maps*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps>
- Granel, M. (20 de Enero de 2020). *Rankia*. Obtenido de ¿Cómo calcular el valor presente de una perpetuidad? Fórmula y ejemplos: <https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3962633-como-calcular-valor-presente-perpetuidad-formula-ejemplos>
- Guada, L. (12 de Mayo de 2020). *Mysuite Factura contigo*. Obtenido de Reparto de utilidades de los trabajadores-PTU: Cálculo y pago: <https://blog.mysuitemex.com/2020/05/12/reparto-de-utilidades-a-los-trabajadores-ptu-calculo-y-pago/>
- Guerrero Peña, A., Anguebes-Franceschi, F., Castelán-Estrada, M., Morales Ramos, V., Córdova Quiroz, A., Zavala Loría, J., & Bolaños Reinoso, E. (2013). Optimization of the biodiesel synthesis using crude african palm oil. *Agrociencia*, 649-659.

- Gutiérrez, I. (24 de Febrero de 2021). *Muy financiero*. Obtenido de ¿Qué es el costo de vida y por qué es tan importante?: <http://www.muyfinanciero.com/conceptos/costo-de-vida/#:~:text=El%20costo%20de%20vida%20es,una%20ciudad%20respecto%20a%20otra>.
- Guzmán Flores, J. (2018). Fertilizantes químicos y biofertilizantes. En J. Guzmán Flores, *Fertilizantes químicos y biofertilizantes* (págs. 3,16, 17, 30, 32, 33, 34). Ciudad de México: CDRSSA.
- Hablemos del campo. (26 de Abril de 2018). *Hablemos del campo*. Obtenido de Campo mexicano: Estados con mayor actividad agrícola: <https://www.hablemosdelcampo.com/campo-mexicano-estados-con-mayor-actividad-agricola/>
- Hafner, G., & Reiser, M. (2018). *Principios básicos del compostaje de pulpa de café*. Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für.
- Hernández, A. (2003). La composta, su elaboración y beneficio. En A. Hernández, *La composta, su elaboración y beneficio* (págs. 17,18). Saltillo: Universidad Autónoma Agraria.
- Hernández Terrones, L. (2020). Impacto del sargazo en el acuífero. *Ciencia*, 42-45.
- Herrera López, D. (2016). Formulación y evaluación de un proyecto de inversión para la creación de una empresa dedicada a la planeación, organización y coordinación de bodas en la ciudad de Metepec, estado de México 2014. En D. Herrera López, *ormulación y evaluación de un proyecto de inversión para la creación de una empresa dedicada a la planeación, organización y coordinación de bodas en la ciudad de Metepec, estado de México 2014* (pág. 31). Estado de México: UAEM.
- Hosseini, R., Asadollah, A., Maryam, P., & Mortaza, A. (2019). Bio-oil production from sargassum macroalgae: A green and healthy source of energy. *Jundishapur J Health Sci*, 1-6.
- HRS. (2020). *HRS heat exchangers*. Obtenido de HRS heat exchangers : <https://www.hrs-heatexchangers.com/mx/medioambiental/digestion-anaerobica-y-biogas/>
- Hummel, C. (s.f.). *La voz de Houston*. Obtenido de El margen de ganancia medio por venta al por mayor: <https://pyme.lavoztx.com/el-margen-de-ganancia-medio-por-venta-al-por-mayor-5162.html>
- Hurtado Arana, H. (2011). Los métodos de precios de transferencia y el ingreso de Chile a la OCDE. *Revista Chilena de derecho*, 511-544.
- INEGI. (2018). *INEGI*. Obtenido de Ingresos y gastos de los hogares: <https://www.inegi.org.mx/temas/ingresoshog/#Tabulados>
- INEGI. (2019). *INEGI*. Obtenido de Índice nacional de precios al consumidor (INPC): [https://www.inegi.org.mx/temas/inpc/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20Nacional%20de%20Precios%20al%20Consumidor%20\(INPC\)%2C%20es,consumen%20las%20familias%20en%20M%C3%A9xico](https://www.inegi.org.mx/temas/inpc/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20Nacional%20de%20Precios%20al%20Consumidor%20(INPC)%2C%20es,consumen%20las%20familias%20en%20M%C3%A9xico).
- INEGI. (19 de Mayo de 2020). *INEGI*. Obtenido de Tasa de desocupación trimestral según entidad federativa: <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.html?nc=624>

- INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de ensidad de población por entidad federativa, 1990 a 2020: [https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion\\_Poblacion\\_07\\_fb7d5132-39f0-4a6c-b6f6-4cbe440e048d](https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion_Poblacion_07_fb7d5132-39f0-4a6c-b6f6-4cbe440e048d)
- INEGI. (Febrero de 2021). *INEGI*. Obtenido de índice nacional de precios al consumidor, ciudades que lo componen por mayor variación: [https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?nc=ca61\\_2018](https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?nc=ca61_2018)
- INEGI. (2021). *INEGI*. Obtenido de Índice nacional de precios al consumidor: <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx>
- INEGI. (11 de Marzo de 2021). *México en cifras*. Obtenido de Información nacional por entidad federativa y municipios: [https://play.google.com/store/apps/details?id=mx.org.inegi.MexicoCifras&hl=es\\_MX&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details?id=mx.org.inegi.MexicoCifras&hl=es_MX&gl=US)
- Infante Villareal, A. (1993). Evaluación financiera de proyectos de inversión. En A. Infante Villareal, *Evaluación financiera de proyectos de inversión* (págs. 29-31). Bogotá: Norma.
- Infoagro. (2016 de Junio de 2017). *Infoagro*. Obtenido de Las algas en la agricultura y su uso como fertilizantes: <https://mexico.infoagro.com/las-algas-en-la-agricultura-y-su-uso-como-fertilizante/>
- Inmuebles24. (2020). *Inmuebles24*. Obtenido de <https://www.inmuebles24.com/>
- Inmuebles24. (s.f.). *Inmuebles 24*. Obtenido de Oficinas en renta en Yucatán: <https://www.inmuebles24.com/oficinas-en-renta-en-yucatan.html>
- Inmuebles24. (s.f.). *Inmuebles24*. Obtenido de Terreno industrial 280000 m2: <https://www.inmuebles24.com/propiedades/en-venta-terrenos-industriales-en-dzitya-merida-59033103.html>
- Irfan, M., Wahab, I., Sarni, Subur, R., & Akbar, N. (2019). Seaweed sargassum sp. as material for biogas production. *AAFL Bioflux*, 2015-2019.
- Isaza Arias, G., Pérez Méndez, M., Laines Canepa, J., & Castañón Nájera, G. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. *Universidad y ciencia*, 233-243.
- Isaza, A., Pérez, M., Laines, C., & Castañón, N. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de materia orgánica. *Uciencia*, 233-243. Obtenido de [www.ujat.mx/publicaciones/uciencia](http://www.ujat.mx/publicaciones/uciencia)
- Janusz Teleszewski, T., & Zukowski, M. (2018). Analysys of heat loss of a biogas anaerobic digester in weather conditions in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 19, 242-250. doi:10.12911/22998993/89660
- JAPAY. (2018). *Juanta de agua potable y alcantarillado de Yucatán*. Obtenido de Tarifas de Mérida: <https://japay.yucatan.gob.mx/tarifas/tarifas.php>

- Jardinitis. (12 de Noviembre de 2018). *Jardinitis Garden lovers*. Obtenido de El floculante líquido y el mantenimiento del agua de piscina: <https://www.jardinitis.com/blog/el-floculante-liquido-y-el-mantenimiento-del-agua-de-piscina-1169/>
- Konda, M., Singh, S., Simmons, B., & Klein-Marcuschamer, D. (2015). An investigation on the economic feasibility of macroalgae as a potential feedstock for biorefineries. *Bioenerg. Res.*, 1046-1056.
- Krunal Acid Agency. (2014). *Hydrochloric Acid (Commercial/CP/LR/AR Grade)*. Obtenido de <http://krunalacid.com/hydrochloric-acid-commercial-cp-lr-ar-grade.htm>:  
<http://krunalacid.com/hydrochloric-acid-commercial-cp-lr-ar-grade.htm>
- Kumar, K., Ghosh, S., Angelidaki, I., Holdt, S., Karakashev, D., Alvarado Morales, M., & Das, D. (2016). Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae. *Renewable and sustainable reviews*, 235-249. doi:10.1016/j.rser.2016.06.055
- Lahaye, M., & Rochas, C. (1991). Chemical structure and physico-chemical properties of agar. *Hydrobiología*, 137-148.
- Lawrence, G. (2007). Use and misuse of capital cost estimate contingency-Why deleting it makes project more expensive, not less. *Pharmaceutical engineering*, VII(5), 1-8.
- Lenin Támara, A., Chica Arrieta, I. E., & Montiel Ensuncho, A. (2017). Metodología de cálculo del beta: Beta de los activos, beta apalancado y beta corregido por cash. *Espacios*, 15-36.
- López Arteaga, T. A. (2017). Estudio de factibilidad para una empresa dedicada a la producción de fertilizantes orgánicos a partir de microalgas. En T. A. López Arteaga, *Estudio de factibilidad para una empresa dedicada a la producción de fertilizantes orgánicos a partir de microalgas* (pág. 55). Ciudad Madero: Tecnológico Nacional de México.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1. *ICIDCA*, 35-48.
- Maneein, S., Milledge, J., Harvey, P., & Nielsen, B. (2020). Methane production from *Sargassum muticum*: effects of seasonality and of freshwater washes. *Journal Pre-Proof*, 1-20.
- Maneein, S., Milledge, J., Nielsen, B., & Harvey, P. (2018). A review of seaweed pre-treatment methods for enhanced biofuel production by anaerobic digestion or fermentation. *MDPI*, 1-31. doi:10.3390/fermentation4040100
- Marin, A., Casas-Valdez, M., Carrillo, S., Hernandez, H., Monroy, A., Sanginés, L., & Pérez-Gil, F. (Diciembre de 2009). The marine algae *Sargassum* spp. (Sargassaceae) as feed for sheep in the tropical and subtropical regions. *Revista de biología tropical*, 57, 1271, 1272.
- Marin, M. L. (2011). Purificación biológica de biogás. En M. L. Marin, *Purificación biológica de biogás* (págs. 20, 29,39). Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Martín, J. (9 de Enero de 2018). *Cerem International Business School*. Obtenido de ¿Entiendes las cinco fuerzas?: <https://www.cerem.mx/blog/entiendes-las-cinco->

fuerzas#:~:text=Las%20cinco%20fuerzas%20es%20un,desarrollar%20una%20estrategia%20de%20negocio.

- Martínez Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Nova Scientia*, 7(15), 96-115.
- Masabni, J., & Lillard, P. (2010). *Jardinería fácil*. Texas: Texas A&M Agrilife extension.
- Mckendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies . *Bioresource technology*, 47-54.
- Méndez Novelo, R., Castillo Borges , E., Vázquez Borges, E., Briceño Pérez, O., Coronado Peraza, V., Pat Canul, R., & Garrido Vivas, P. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. *Ingeniería*, 13-21.
- Méndez Novelo, R., Castillo Borges, E., Vazquez Borges, E., Briceño Pérez, O., Coronado Peraza, V., Pat Canul, R., & Garrido Vivas, P. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. *Ingeniería, revista académica de la FI-UADY*, 13-21.
- Méndez, E. (11 de Marzo de 2021). *Excelsior*. Obtenido de Marina retira 38 mil 892 toneladas de sargazo en casi 3 meses: <https://www.excelsior.com.mx/nacional/marina-retira-38-mil-892-toneladas-de-sargazo-en-casi-3-meses/1325477>
- Mercado libre. (s.f.). *Mercado libre*. Obtenido de Costal de rafia laminado: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-780618489-costal-de-rafia-laminado-45x75cm-blanco-500-piezas-\\_JM#position=6&type=item&tracking\\_id=34d80298-cc44-4d46-82fd-2c48d37fdaf7](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-780618489-costal-de-rafia-laminado-45x75cm-blanco-500-piezas-_JM#position=6&type=item&tracking_id=34d80298-cc44-4d46-82fd-2c48d37fdaf7)
- Mexico Red. (s.f.). *Fertilizantes*. Obtenido de Proveedores, distribuidores y fabricantes de fertilizantes: <http://fertilizantes.mexicored.com.mx/>
- México truckload. (6 de Febrero de 2020). *México truckload*. Obtenido de Presentación servicios: <http://www.mexicotruckload.com/acerca-del-sitio/presentaci%C3%B3n-servicios.html>
- Michael Somers, C. (2009). Modeling absorption chiller in aspen. En C. Michael Somers, *Modeling absorption chiller in aspen* (págs. 3, 13). Maryland: University of Maryland.
- Micorrizas suppra. (s.f.). *Mercado libre*. Obtenido de Composta sutrato orgánico: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-833906259-composta-sustrato-organico-50k-\\_JM#position=9&type=pad&tracking\\_id=2f8cc00d-9a8e-48e8-82ea-c25b95f2d06f&is\\_advertising=true&ad\\_domain=VQCATCORE\\_LST&ad\\_position=9&ad\\_click\\_id=ZjdlZTk0MzktNTkxNy00NTBmLTg5ZT](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-833906259-composta-sustrato-organico-50k-_JM#position=9&type=pad&tracking_id=2f8cc00d-9a8e-48e8-82ea-c25b95f2d06f&is_advertising=true&ad_domain=VQCATCORE_LST&ad_position=9&ad_click_id=ZjdlZTk0MzktNTkxNy00NTBmLTg5ZT)
- Milldget, J., Smith, B., Dyer, P., & Harvey, P. (2014). Macroalgae derived biofuel: A review of methods of energy extraction from seaweed biomass. *Energies*, 7194-7222. doi:10.3390/en7117194

- Milledge, J., & Harvey. (2016). Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*. doi:10.3390/jmse4030060
- Milledge, J. J., Nielsen, B. V., Sadek, M. S., & Harvey, P. J. (5 de Julio de 2018). Effect of freshwater washing pretreatment on Sargassum muticum as a feedstock for biogas production. *Energies*, 2. doi:10.3390/en11071771
- Milledge, J., & Harvey, P. (2016). Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*. doi:10.3390/jmse4030060
- Milledge, J., Nielsen, B., & Bailey, D. (2015). High value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, Sargassum muticum. *Eviron Sci Biotechnol*, 15, 67-88. doi:10.1007/s11157-015-9381-7
- Miranda, F. (12 de Mayo de 2020). *Milenio*. Obtenido de En riesgo selvas y cenotes de Yucatán por megagránjas porcinas: <https://www.milenio.com/estados/estiercol-megagránjas-porcinas-dana-cenotes-selvas-yucatan>
- Morales Paredes, G., & Pico López, D. P. (2009). Microempresa para la producción de biofertilizantes a partir de residuos orgánicos. En G. Morales Paredes, & D. P. Pico López, *Microempresa para la producción de biofertilizantes a partir de residuos orgánicos* (pág. 15). Ciudad de México: IPN.
- Moreano, X. (5 de Octubre de 2016). *Puromarketing*. Obtenido de ¿Cuál es la inversión en publicidad que debe hacer un negocio?: <https://www.puromarketing.com/66/27778/cual-inversion-publicidad-debe-hacer-negocio.html>
- Morero, B. (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. En B. Morero, *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias* (pág. 174). Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y tecnología*, 187-201.
- Morín Maya, E., & Alvarado Roldán, L. (2017). *Indicadores de rentabilidad*. CEPEP.
- Murphy, Drosig, Allen, Jerney, Xia, & Herrmann. (2015). A perspective on algal biogas. En Murphy, Drosig, Allen, Jerney, Xia, & Herrmann, *A perspective on algal biogas* (págs. 7,9,11,13,14,16,29). IEA Bioenergy.
- Murphy, J., Drosig, B., Allen, E., Jaqueline, J., Xia, A., & Herrman, C. (2015). A perspective on algal biogas. En J. Murphy, B. Drosig, E. Allen, J. Jaqueline, A. Xia, & C. Herrman, *A perspective on algal biogas* (Primera ed., págs. 12, 16). IEA Bioenergy. Recuperado el 14 de Diciembre de 2019
- Nachwachsende, R. (2010). Guía sobre el biogás, desde su producción hasta su uso. En R. Nachwachsende, & F. N. (FNR) (Ed.), *Guía sobre el biogás, desde su producción hasta su*

- uso (págs. 23,24,35,36,39,59,70,72,123,125,129,214,215). Alemania: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Recuperado el 03 de Diciembre de 2019
- Nacional financiera. (2004). *¿Qué es la inflación?* Ciudad de México.
- Nagy, G., & Wopera, Á. (2012). Biogas production from pig slurry-feseability and challenges. *Material science and engineering*, 65-75.
- Navarrete, P., & Cole, W. (2001). Planning, estimating and control of chemical construction projects. En P. F. Navarrete, & W. Cole, *Planning, estimating and control of chemical construction projects* (págs. 37-46, 113). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Navarrete, P., & Cole, W. (2001). Planning, estimating and control of chemical construction projects. En P. F. Navarrete, & W. Cole, *Planning, estimating and control of chemical construction projects* (págs. 37-46). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Navarrete, P., & Cole, W. (2001). Planning, estimating and control of chemical construction projects. En P. F. Navarrete, & W. Cole, *Planning, estimating and control of chemical construction projects* (págs. 2, 3, 37-46, 113). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Nicolé Roldán, P. (s.f.). *Economipedia*. Obtenido de Oligopolio: <https://economipedia.com/definiciones/oligopolio.html>
- Nolan, T., Troy, S., Gilkinson, S., Frost, P., Xie, S., Zhan, X., . . . Lawlor, P. (2012). Economic analyses of pig manure treatment options in Ireland. *Bioresource Technology*, 15-23.
- Notimex. (20 de Agosto de 2019). Primer buque recolector de sargazo estará listo en octubre. *Publimetro*. Obtenido de <https://www.publimetro.com.mx/mx/noticias/2019/08/20/primer-buque-recolector-sargazo-estara-listo-en-octubre.html>
- Núñez Jiménez, E. (1997). Guía para la preparación de proyectos de servicios públicos municipales. En E. Núñez Jiménez, *Guía para la preparación de proyectos de servicios públicos municipales* (págs. 61-83). Toluca: INAP.
- Nwakaire, J., Ezeoha, S., & Ugwuishiwu, B. (2013). Production of cellulosic ethanol from wood sawdust. *CIGR Journal*, 136-140.
- OCC. (19 de enero de 2021). *occmundial*. Obtenido de occmundial: <https://www.occ.com.mx/blog/que-es-un-analisis-foda-y-como-se-hace/>
- Olaya, Y., & Octavio, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. En Y. Olaya, & O. Luis, *Fundamentos para el diseño de biodigestores* (págs. 7,19,20,22). Palmira, Colombia: Universidad nacional de Colombia.
- Ordaz, Y. (26 de Noviembre de 2019). *Milenio*. Obtenido de Precios de ceetificados de energía limpia caerán con nuevas disposiciones: experto: <https://www.milenio.com/negocios/precios-cel-desplomaran-70-disposiciones-experto>

- Ordóñez Díaz, J. A., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M., & Dávalos Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas. *Maderas y bosques*, 77-126.
- Ortega Viera, L., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Sanatana, E., & Bárcenas Pérez, L. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 45-56.
- Pacheco, Bertot, P., & Juliá Junco, E. (2006). Secado de la madera, calentamiento a conducción transitoria. *Tecnología química*, 26-32.
- Paredes Cervantes, S., Barahona Pérez, L. F., Barroso Tanoira, F., & Ponce Marbán, D. (2020). Biocombustibles y su potencial en el mercado energético mexicano. *Revista de economía*, 37(94), 35-56. doi:10.33937/reveco.2020.128
- Petersson, A., & Wellinger, A. (2009). Biogas upgrading technologies-developments and innovations. En A. Petersson, & A. Wellinger, *Biogas upgrading technologies-developments and innovations* (págs. 6-9). IEA Bioenergy.
- Petersson, A., & Wllinger, A. (2009). Biogas upgrading technologies-developments and innovations. *IEA Bioenergy*, 6.
- Poder legislativo del estado libre y soberano de Quintana Roo. (9 de Diciembre de 2019). *Leyes estatales*. Obtenido de Ley de cuotas y tarifas para los servicios p+ublicos de agua potable y alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales del estado de Quintana Roo: <https://www.congresoqroo.gob.mx/leyes/16/>
- Polonsky, V. S., Tarasov, D. A., & Gorr, D. A. (2019). Configuration of evaporators for once-through heat recovery steam generators of combined-cycle units. *Thermal engineering*, 340-349. doi:10.1134/S0040601519050082
- Preeti, S., & Akash Sambshio, M. (2021). Study on yield percentage of biodiesel from waste cooking oil using transesterification. *International journal of applied engineering research*, 154-160.
- Project management institute. (2017). A guide to the project management body of knowledge. PMBOOK GUIDE. En P. m. institute, *A guide to the project management body of knowledge. PMBOOK GUIDE*. (págs. 156,157). Pennsylvania: PMI.
- Propiedades. (2021). *Propiedades.com*. Obtenido de <https://propiedades.com/>
- Punto H2O. (s.f.). *H2OpuntoH2O*. Obtenido de Floculante flokant 10 l: [https://puntoh2o.com/products/quimicos-41?variant=33026268332076&currency=MXN&utm\\_medium=product\\_sync&utm\\_source=google&utm\\_content=sag\\_organic&utm\\_campaign=sag\\_organic&utm\\_campaign=gs-2020-06-04&utm\\_source=google&utm\\_medium=smart\\_campaign](https://puntoh2o.com/products/quimicos-41?variant=33026268332076&currency=MXN&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_campaign=gs-2020-06-04&utm_source=google&utm_medium=smart_campaign)
- Quiminet. (2016). *Quiminet. Información y negocios segundo a segundo*. Obtenido de Precios de aserrín de madera: <https://www.quiminet.com/productos/aserrin-de-madera-127020338121/precios.htm>

- Rocca, S., Agostini, A., Giuntoli, J., & Marelli, L. (2015). Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions; Insights from a literature review. En S. Rocca, A. Agostini, J. Giuntoli, & L. Marelli, *Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions; Insights from a literature review* (págs. 9,13,14,35). European Union. doi:10.2790/125847
- Rodríguez Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B., & Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del caribe mexicano. En R. E. Rodríguez Martínez, B. Van Tussenbroek, & E. Dahlgren, *Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del caribe mexicano* (págs. 362, 363). Pueeto Morelos: UNAM.
- Rodríguez Suárez, M. (2020). *La utilidad en la industria de la construcción*. México: costos mx.
- Rodríguez, S. M., & Córdova, V. A. (2006). Manual de compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos urbanos. En S. M. Rodríguez, & V. A. Córdova, *Manual de compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos urbanos*. (pág. 87). México: SEMARNAT.
- Rojas López, M. D., & Bohórquez Patiño, N. A. (2010). Aproximación metodológica para el cálculo del AIU. *Dyna*, 293-302.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. En P. Román, M. Martínez, & A. Pantoja, *Manual de compostaje del agricultor* (págs. 25, 27, 31, 48). Santiago, Chile: FAO.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. En P. Román, M. Martínez, & A. Pantoja, *Manual de compostaje del agricultor* (págs. 22,23,24,25,27,31,48). Santiago, Chile: FAO.
- Romero P., F. (7 de Enero de 2016). *Project Management Institute*. Obtenido de ¿Qué es mejor para mi proyecto: EPC, EPCM, llave en mano, D&B, BOT, otro? Estrategía de contratos para mi proyecto: <http://www.pmi.cl/pmi/que-es-mejor-para-mi-proyecto-epc-epcm-llave-en-mano-db-bot-otro-estrategia-de-contratos-para-mi-proyecto/>
- Rosas Medellín, D. F. (2019). Utilización de sargassum spp. para síntesis verde de nanopartículas de platino y producción de carbón para aplicaciones en la generación de energía. En D. F. Rosas Medellín, *Utilización de sargassum spp. para síntesis verde de nanopartículas de platino y producción de carbón para aplicaciones en la generación de energía* (pág. 4). Mérida: CICY.
- Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2012). Fiananzas corporativas. En S. Ross, R. Westerfield, & J. Jaffe, *Fiananzas corporativas* (págs. 20-25). México: McGrawHill.
- Rueda, M. F., Rueda, M. A., Toledo, V. M., Quinto, D. P., Tolentino, E. G., & Abugaber, F. J. (2011). Evaluation of the gas turbine inlet temperature with relation to the excess air. *Energy and Power Engineering*, 517-524. doi:10.4236/epe.2011.34063
- Ruiping, H., Kiros, H., Xiaoyan, J., Zhang, S., Jingjing, C., Zhuhong, Y., . . . Changsong, W. (2016). Review on heat-utilization processes and heat-exchange equipment in biogas engineering.

- Journal of renewable and sustainable energy*, 8, 032701\_1-032701\_17.  
doi:10.1063/1.4949497
- Rus Arias, E. (s.f.). *Economipedia*. Obtenido de Análisis de sensibilidad:  
<https://economipedia.com/definiciones/analisis-de-sensibilidad.html>
- Sánchez Velasco, E., Van der Wal Lima, M., López Zavaleta, H., Vázquez Morillas, A., Espinosa Valdemar, R. M., & Álvarez Zeferino, J. C. (2016). Operación de 7 plantas de composta en la ciudad de México. *Los residuos sólidos como fuentes de materiales y energía*, 244-252.
- SCT. (s.f.). *Secretaría de comunicaciones y transportes*. Obtenido de Dirección general de desarrollo carretero información de las vías:  
[http://app.sct.gob.mx/sibuac\\_internet/ControllerUI?action=cmdDatosOperRepDet&idVia=52](http://app.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdDatosOperRepDet&idVia=52)
- SDG. (1999). *Manual de producción de frío por absorción a gas natural*. Dirección de desarrollo de aplicaciones de distribución de gas natural.
- Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). Biogas handbook. En 978-87-992962-0-0, *Biogas handbook* (págs. 22,23,41). Esbjerg, Dinamarca: University of Southern Denmark Esbjerg.
- SEGOB. (22 de Diciembre de 2016). *Diario oficial de la federación*. Obtenido de DOF:  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5466651&fecha=22/12/2016](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5466651&fecha=22/12/2016)
- SEGOB. (20 de Enero de 2020). *SEGOB Diario oficial de la federación*. Obtenido de CFE transmisión:  
[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5584400&fecha=20/01/2020](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5584400&fecha=20/01/2020)
- SEGOB. (8 de Enero de 2021). *Gobierno de México*. Obtenido de El riesgo país de México se mantiene en su menor nivel desde marzo de 2020:  
<https://www.gob.mx/shcp/gacetaeconomica/es/articulos/el-riesgo-pais-de-mexico-se-mantiene-en-su-menor-nivel-desde-marzo-de-2020?idiom=es#:~:text=El%20riesgo%20pa%C3%ADs%20de%20M%C3%A9xico%2C%20medido%20a%20trav%C3%A9s%20del%20C3%8Dndice,4%20de%20marzo%20>
- SEGOB. (s.f.). *SAT*. Obtenido de Artículo 9. Determinación del ISR ejercido:  
<https://www.sat.gob.mx/articulo/93578/articulo-9>
- SEMARNAT. (2014). *Consumo aparente de fertilizantes*. Obtenido de  
[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores16/conjuntob/indicador/02\\_agua/2\\_2\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores16/conjuntob/indicador/02_agua/2_2_3.html)
- SENER. (4 de Septiembre de 2018). *Atlas nacional de biomasa*. Obtenido de ANBIO:  
<https://dgel.energia.gob.mx/anbio/mapa.html?lang=es>
- SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. En SENER, SEMARNAT, CONAGUA, ANEAS, & GIZ, *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales* (Primera ed., págs. 35,42,68,81,102,118,122,123,126,130). México.

- SENER; SEMARNAT; CONAGUA; ANEAS; GIZ. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. En SENER, SEMARNAT, CONAGUA, ANEAS, & GIZ, *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales* (Primera ed., págs. 33, 35, 37, 38, 42, 68, 81, 102, 118, 122, 123, 126, 130). México.
- Servicio agrícola y ganadero región Atamaca. (2017). *Pauta técnica para la aplicación del compost*. Chile.
- Shenzhen Yataida High-Tech Co., Ltd. (2021). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/low-price-e-glass-fiber-for-pe-pa-nylon-1600062980225.html?spm=a2700.8699010.29.32.1cb472ebHUcKqQ>
- SIAP. (2019). *Servicio de información agroalimentaria y pesquera*. Obtenido de Avance de siembras y cosechas avance por estado: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do)
- Sígler, É. (29 de Febrero de 2019). *Manufactura*. Obtenido de Entre CFE y las empresas privadas ¿Quién produce la electricidad más cara?: <https://manufactura.mx/energia/2019/02/23/entre-cfe-y-las-empresas-privadas-quien-produce-la-electricidad-mas-cara>
- Singh, K. L. (s.f.). *Optimize compressor parameters for reduced inlet pressure and gas flow*. Obtenido de Optimize compressor parameters for reduced inlet pressure and gas flow: <http://gasprocessingnews.com/features/201410/optimize-compressor-parameters-for-reduced-inlet-pressure-and-gas-flow.aspx>
- Smith, J., Van Ness, H., & Abbott, M. (2007). Introducción a la termodinámica en la ingeniería química. En J. Smith, H. Van Ness, & M. Abbott, *Introducción a la termodinámica en la ingeniería química* (pág. 684). México: McGraw-Hill.
- SNIIM. (28 de Febrero de 2021). *Sistema nacional de información e integración de mercados*. Obtenido de Mercados nacionales. Insumos agrícolas: <http://www.economia-sniim.gob.mx/Nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaInsumos.aspx?SubOpcion=9|0>
- Solano, R., & Rodríguez, B. (2019). *Sargazo 2019: Efectos en el Caribe*. México: Grupo financiero Monex.
- Solar Turbines. (2009). *Saturn 20*. San Diego: Caterpillar Company.
- Solis, A. (25 de Noviembre de 2019). *Forbes*. Obtenido de Los certificados de energía limpia impactaron tarifas eléctricas: CFE: <https://www.forbes.com.mx/certificados-de-energia-limpia-impactaron-tarifas-electricas-cfe/#:~:text=%E2%80%9CCon%20la%20modificaci%C3%B3n%20al%20acuerdo,un%20mercado%20de%20competencia%20igualitario%E2%80%9D.&text=La%20compa%C3%B1a%20revel%C3%B3%20q>

- Somers, C., Mortazavi, A., Hwang, Y., R., R., Rodgers, P., & Al-Hashimi, S. (2011). Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus. *ELSEVIER*, 4197-4205. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.018
- Soreanu, G., Béland, M., Falleta, P., Edmonson, K., Svoboda, L., Al-Jamal, M., & Seto, P. (2011). Approches concerning siloxane removal from biogas-A review. *Canadian biosystems engineering, LIII*, 8.1-8.18.
- Soria Fregoso, M., Ferrera Cerrato, R., Etchevers Barra, J., Alcántar González, G., Trinidad Santos, J., Borgés Gómez, L., & Pereyda Pérez, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamerica*, 353-362.
- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, B., Alcantar, G., Trinidad, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra latinoamericana*, 19(4), 353-362.
- Strezov, V., & Evans, T. J. (2015). Biomass processing technologies. En V. Strezov, & T. J. Evans, *Biomass processing technologies* (págs. 177-212). Boca Raton: CRC Press.
- Suárez, J., Jácome, A., & Rodríguez, P. (2015). Tecnologías de deshidratación de fangos. En J. Suárez, A. Jácome, & P. Rodríguez, *Tecnologías de deshidratación de fangos* (pág. 6). Coruña, España: Inditex.
- Suárez, J., Jácome, A., & Rodríguez, P. (2015). Tecnologías de deshidratación de fangos. En J. Suárez, A. Jácome, & P. Rodríguez, *Tecnologías de deshidratación de fangos* (pág. 6). Coruña, España: Inditex.
- T. Walsh, K. (2018). Examining the quality of a compost product derived from sargassum (sargassum fluitans and sargassum natans). En K. T. Walsh, *Examining the quality of a compost product derived from sargassum (sargassum fluitans and sargassum natans)* (págs. 16, 19, 20). Texas: Texas State University.
- Tapia-Tussell, Ávila-Arias, Maldonado, D., David, V., Olguin-Maciél, Pérez-Brito, & Alzate-Gaviria. (2018). Biological Pretreatment of Mexican Caribbean Macroalgae Consortiums Using Bm-2 Strain(*Trametes hirsuta*) and Its Enzymatic Broth to Improve Biomethane Potential. *Energies*, 494-505. doi:doi:10.3390/en11030494
- Tawalbeth, M., Salameh, T., Albawab, M., Al-Othman, A., Assad, M., & Alami, A. (2020). Parametric study of a single effect lithium bromide-water absorption chiller powered by a renewable heat source. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems*, 464-475.
- Téllez Santana, C. A. (2008). Diseño y selección de elementos para una planta de biogás. En C. A. Téllez, *Diseño y selección de elementos para una planta de biogás* (págs. 32,33). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Telmex. (2021). *Telmex*. Obtenido de Elige el mejor paquete de telefonía, internet y soluciones de negocio: <https://telmex.com/web/negocios/paquetes-infinitum->

negocio?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UepkALZi9DeO5KS52iTbVu67IaU-DsSzQBP6OLxPzBCamPq0MV-

- Thomson, T., Young, B., & Baroutian, S. (2019). Pelagic sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and sustainable energy reviews*. doi:10.1016/j.rser.2019.109564
- Torres Beristain, B. (2019). El sargazo en las costas mexicanas. *La ciencia y el hombre*, XXXII(1).
- Union Yucatán. (25 de Febrero de 2019). *Union Yucatán*. Obtenido de Mérida, la sexta ciudad que sube más d eprecios:  
<https://www.unionyucatan.mx/articulo/2019/02/25/economia/merida-la-sexta-ciudad-que-mas-sube-precios>
- Valencia Castillo, A., Hernández Beltrán, A., & López de Buen, L. (Agosto de 2011). *La ciencia y el hombre*. Obtenido de Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol24num2/articulos/ensilaje/>
- Valiente, B. A. (2008). Problemas de transferencia de calor. En B. A. Valiente, *Problemas de transferencia de calor* (pág. 16). México: Limusa.
- Valle, A. (17 de Agosto de 2018). *Obras por expansión*. Obtenido de Obras por expansión:  
<https://obras.expansion.mx/construccion/2018/08/17/tramites-para-construir-en-mexico-representan-8-del-coste-de-la-obra>
- Van Amsterdam, M. (2018). Factorial techniques applied in chemical plant cost estimation : A comparative study based in literature and cases. En M. Van Amsterdam, *Factorial techniques applied in chemical plant cost estimation : A comparative study based in literature and cases* (págs. 109, 110). Delft: Delft University ofTechnology.
- Varillas, A. (1 de Mayo de 2019). *El universal*. Obtenido de Vuelve sargazo a playas del caribe mexicano: <https://www.eluniversal.com.mx/estados/vuelve-sargazo-playas-en-el-caribe-mexicano>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual de biogás. En M. T. Varnero Moreno, *Manual de biogás* (págs. 17-48). Santiago de Chile: Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura (FAO).
- Varnero, M., Muñoz, S., & Zúñiga, R. (2009). Valorización agrícola de purines porcinos procesados con aserrín de pino. *Información tecnológica*, 20(6), 85-92.  
 doi:10.1612/inf.tecnol.4125it.08
- Varnero, M., Muñoz, S., & Zúñiga, R. (2009). Valorización agrícola de purines procinos procesados con aserrín de pino. *Información tecnológica*, 20(6), 85-92.  
 doi:10.1612/inf.tecnol.4125it.08
- Vélez Pareja, I., & Tham, J. (2012). Más allá de las proyecciones: El valor terminal. . *SSRN*, 1-17.
- Vice Chairman, M. A., Asaoka, K., Atsumi, M., & Sakou, T. (2007). *Seaweed bioethanol production in Japan-The ocean sunrise project*. Vacouver: OCEAN.

- Villar, K. (12 de Marzo de 2016). *MKTToatal*. Obtenido de ¿Qué son las 5 fuerzas de Porter?: <https://www.mercadotecniatotal.com/mercadotecnia/que-son-las-5-fuerzas-de-porter/>
- Vivanuncios. (2021). *vivanuncios*. Obtenido de <https://www.vivanuncios.com.mx/>
- Vos, B., Foursoff, W., Bruijn, L., & Bruijn, W. (2016). Coastal seaweed solution. En B. Vos, W. Foursoff, L. Bruijn, & W. Bruijn, *Coastal seaweed solution* (págs. 35-42). Netherland: Tudelft.
- Wuxi Shuhang Machinery Science & Technology Co., Ltd. (19 de Noviembre de 2020). *Alibaba.com*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/2020-centrifuge-decanter-decanter-centrifuge-waste-water-decanter-centrifuge-for-waste-water-60473813884.html?spm=a2700.8699010.normalList.14.786135aapCUuAK&s=p>
- Yangali, M. (5 de Junio de 2019). *Contralinea*. Obtenido de El sargazo llega por miles de toneladas a las playas, la semar recoge decenas: <https://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/2019/06/05/el-sargazo-llega-por-miles-de-toneladas-a-las-playas-la-semar-recoge-decenas/>
- Yeon, J., Seo, H., Choi, W., & Choi, W. (2011). Bioethanol production from hydrolysate of seaweed sargassum sagamianum. *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal*, 283-288.
- Yucatán premier bienes raices. (18 de Diciembre de 2013). *Yucatán premier bienes raices*. Obtenido de La verdad sobre la venta de terrenos en Mérida: <http://yucatanpremier.com.mx/blog/blog-68-la-verdad-sobre-la-venta-de-terrenos-en-merida.html#:~:text=Actualmente%20la%20venta%20de%20terrenos,y%20norte%20>