



Instituto Politécnico Nacional

Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios Sobre Medio Ambiente y Desarrollo

(CIIEMAD)

Producción de Biogas a partir de sargazo como una alternativa de manejo

Presenta:

Ing. Mariana Abigail Muñoz Díaz

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la
Sustentabilidad

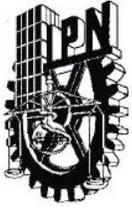
Directores de Tesis:

Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez

Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo



Ciudad de México, noviembre 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a de del

El Colegio de Profesores de Posgrado de en su Sesión
(Unidad Académica)

No. celebrada el día del mes de de conoció la solicitud presentada por la alumna:

Apellido Paterno:	MUNOZ	Apellido Materno:	DÍAZ	Nombres:	MARIANA ABIGAIL
-------------------	-------	-------------------	------	----------	-----------------

Número de registro:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa a la aspirante el tema de tesis titulado:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: 2° Director:
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por la alumna en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- La interesada deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

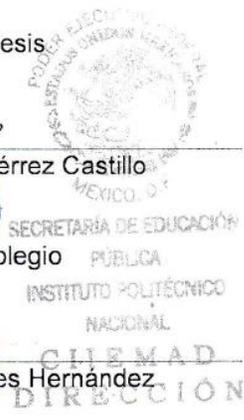
Director de Tesis
Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez

2° Director de Tesis
Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo

Aspirante

Mariana Abigail Muñoz Díaz

Presidente del Colegio
Dr. Víctor Florencio Santes Hernández





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 15:00 horas del día 23 del mes de noviembre del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: CIEMAD para examinar la tesis titulada:

Producción de Biogas a partir de sargazo como una alternativa de manejo del (la) alumno (a):

Apellido Paterno: Muñoz	Apellido Materno: Diaz	Nombre (s): Mariana Abigail
--------------------------------	-------------------------------	------------------------------------

Número de registro: B 1 9 0 1 8 1

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 12 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: (Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)

Las similitudes que se hallaron en el texto se encuentran en el contenido de la tesis, en la sección de metodología y marco legal aplicable. Las referencias se citaron correctamente en el texto, utilizando el formato APA (7ta edición).

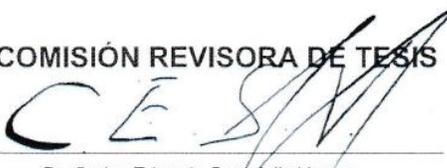
****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

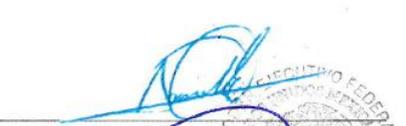
Satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez
Director de Tesis


Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo
2ª Directora de Tesis

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. Carlos Eduardo Santolalla Vargas

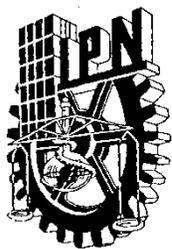

M. en C. Claudia Rodríguez Tapia


Dr. Armando de Jesús Espadas Álvarez


Dr. Víctor Florencio Santes Hernández
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
CIEMAD
DIRECCIÓN

Página 1 de 1



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, siendo el día 23 del mes de noviembre del año 2021, el (la) que suscribe Mariana Abigail Muñoz Díaz alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con número de registro B190181, adscrito(a) al Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y de la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo y cede los derechos del trabajo titulado Producción de Biogas a partir de sargazo como una alternativa de manejo, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones mmunozd1100@alumno.ipn.mx, ltovarg@ipn.mx y mgutierrezc@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Mariana Abigail Muñoz Díaz Nombre y firma del alumno(a)

CRÉDITOS

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Maestría fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, bajo la dirección del Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo, con el apoyo financiero de los proyectos de investigación CIIEMAD-IPN proyecto SIP número 20200776 (2020) y 20210954 (2021) de las becas CONACYT agosto 2019 a julio 2021, estímulo institucional de formación de investigadores (BEIFI) periodo enero-julio 2020, agosto-diciembre 2020 y enero-diciembre 2021.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la oportunidad que me brindó para cursar el posgrado con el financiamiento que me otorgaron y que gracias a ello logro llegar a la conclusión del mismo.

A CIEMAD-IPN: Gracias a todos y cada una de las personas que conocí en este centro, por tantos días que fue mi segunda casa y el placer de llevarme nuevas amistades.

Al Dr. Luis Raúl Tovar: Gracias Dr. por recibirme en su equipo de trabajo, por la oportunidad y confianza depositada en mí para desarrollar destrezas en su espacio de laboratorio, por el apoyo para tener todos los elementos necesarios para llevar a cabo mi trabajo en laboratorio.

A la Dra. María Eugenia: Gracias Dra. Por cada crítica constructiva para mi formación, por abrir mis ojos a ver la ciencia con un mejor criterio y por buscar siempre sacar lo mejor de mí.

Al Dr. Armando Espadas y el Dr. Carlos Santolalla: Gracias Doctores por su acompañamiento a lo largo de mi proceso de formación en el posgrado, por sus comentarios para mejorar mi trabajo.

A la M. en C. Claudia Rodríguez: Estimada maestra, gracias por compartir su conocimiento conmigo en laboratorio, por la motivación y amistad que me brindó.

A mis padres: Gracias por el apoyo en cada etapa de mi vida, en especial en este sueño que decidí emprender, por no dejar de motivarme, ayudarme y acompañarme en mis altas y bajas. Por confiar siempre en mí y no permitirme claudicar.

A mi abuelito Porfirio: Querido abuelito, sin tu ayuda esta etapa de mi vida sería otra, agradezco tu apoyo y amor incondicional, la confianza ciega que me das y lo mucho que crees en mí. Este paso especial en mi vida profesional está dedicado especialmente a ti, porque tengo fe en que nos queda mucho por compartir juntos.

A mis hermanos Daniel y Miriam (y a mi pequeño Isma): Gracias queridos hermanos por su comprensión en cada sueño que emprendo, porque me motivan, ayudan y acompañan. Porque cuando lo he necesitado están para cuidarme y no me dejan sola; espero que al igual que yo cumplan todos y cada uno de sus sueños, estaré siempre para ustedes.

A mis padrinos Guillermo y Gabriela: Ustedes son como mis segundos padres, siempre están conmigo y nunca dejaron de potencializar mis ánimos para lograr cada meta en mi vida. Gracias por siempre apoyarme en mis decisiones de vida y no dudar de mis capacidades para lograrlo.

A la familia Ibarra Díaz: Quiero darles un agradecimiento especial porque en uno de los momentos más difíciles en lo que va de mi vida no me soltaron, por su cariño, confianza, motivación y por compartirme su hogar y hermosa familia.

A mis compañeros de generación, Ana y Gustavo: Gracias por los momentos únicos que compartimos en toda esta experiencia, por la amistad que nació de nuestro paso por CIEMAD y por llevar más allá de las paredes de las aulas el compañerismo.

A cada uno de mis amigos de otras generaciones y equipos de trabajo en CIEMAD: Amigos (AA), que gusto conocerlos y saber que podemos contar unos con otros para lograr metas, sin duda una de las mejores experiencias que me llevo es conocerlos y tener un compañerismo único.

A mi compañera Kari Gállego: Estimada Kari, sin duda alguna fuiste muy importante en mi paso por el posgrado, no tengo forma de agradecerte el conocimiento que me compartiste, tu aportación a mi formación es invaluable y me llevo esa enseñanza de ti, compartir el conocimiento a otras generaciones con toda la paciencia y compañerismo.

A mi familia materna y paterna: Por cada uno de los que siempre tienen interés en mis proyectos de vida y que además están en las buenas y malas conmigo, a mis primos, primas, tíos y tías que no me dejan.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ACRÓNIMOS	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUCCIÓN	3
II. ANTECEDENTES	8
II.1 El arribo de sargazo a playas del Caribe Mexicano	8
II.1.1 El origen del sargazo que llega al Caribe Mexicano	10
II.2. Producción de biogás como una alternativa para el manejo y aprovechamiento del sargazo	12
II.3 Viabilidad de la digestión anaerobia con sargazo como sustrato	14
II.4. Marco normativo para el manejo del sargazo	19
III. HIPÓTESIS	20
IV. OBJETIVOS	20
IV.1 Objetivo general	20
IV.2 Objetivos particulares	21
V. METODOLOGÍA	21
V.1 Diseño del estudio	21
V.1.1 Área de recolección, sitios de muestreo, muestreo, preservación y preparación de submuestras	23
V.1.2. Recolección, preservación y preparación de muestras de sargazo	25
V.1.3. Recolección, preservación y preparación de muestras de FORSU	27
V.1.4. Recolección, preservación y preparación de muestras de inóculo	29
V.1.4. Selección de parámetros fisicoquímicos para sargazo, inóculo y digestato	30
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
VI.1. Resultados de la caracterización fisicoquímica del sargazo	40

VI.2 Resultados del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM)	44
VI.2.1. Calidad del biogás producido.....	51
VI.2.2. Relación del balance de materia en el proceso de digestión anaerobia	51
VII.1 Resultados de calidad del digestato.....	53
VII.1.2. Evaluación del producto digestato respecto a la NADF-020-AMBT-2011	55
VIII. CONCLUSIONES	61
IX. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	62
X. REFERENCIAS.....	62
IX.1 Normatividad consultada	72
XI. Anexos	74
Anexo I. Memoria de cálculo para cantidades (g y ml) de sargazo, FORSU e inóculo para cada mezcla propuesta.	74
Anexo II. Ecuaciones empleadas para la estandarización de resultados del PBM.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes de rendimientos de metano obtenidos con digestión anaerobia de Sargazo	17
Tabla 2. Características físico químicas del sargazo determinadas por otros autores.	18
Tabla 3. Marco normativo para el manejo del sargazo en México.	20
Tabla 4. Métodos de prueba de parámetros fisicoquímicos para caracterización del Sargassum spp.	32
Tabla 5. Promedio de sólidos volátiles añadidos en el set de experimentos de los sustratos e inóculo.	36
Tabla 6. Resultados de parámetros físicos y químicos de sargazo, FORSU e inóculo.....	42

Tabla 7. Comparativo de datos históricos de rendimientos de biogás y metano trabajados con el mismo tipo de inóculo.	47
Tabla 8. Parámetros determinados para los digestatos del set de experimentos analizados.	54
Tabla 9. Concentraciones de metales pesados detectados en sustratos y digestatos del proceso de co-digestión anaerobia.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático del diseño del estudio de investigación.	22
Figura 2. Mapa de ubicación de la playa “El niño”, zona de muestreo, estado de Quintana Roo, fuente elaboración propia, adaptación de SEMA (2018). Google earth.	24
Figura 3. Recolección del inóculo.	29
Figura 4. Diagrama general del proceso de montaje de viales de co-digestiones y controles del experimento.	37
Figura 5. Cuantificación del volumen de biogás generado por desplazamiento de columna.	38
Figura 6. Diagrama general del proceso de monitoreo de composición y volumen de biogás generado.	39
Figura 7. Tendencia de la producción de biogás en los controles y la FORSU.	46
Figura 8. Tendencia de la producción de metano en los controles y la FORSU. ...	46
Figura 9. Tendencia de la producción de biogás en el sargazo y co-digestiones sargazo-FORSU.	48
Figura 10. Tendencia de la producción de metano en sargazo y la co-digestión de sargazo-FORSU.	49

ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)
CH ₄	Metano
CH ₃ COOH	Ácido acético
C ₂ H ₅ OH.	Etanol
C ₃ H ₆ O ₂	Ácido propiónico
C ₃ H ₆ O ₃	Lactato
C ₄ H ₈ O ₂	Ácido butírico
C ₅ H ₁₀ O ₂	Ácido valérico
CIEMAD	Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo
C/N	Relación Carbono-Nitrógeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
FONDEN	Fondo Nacional de Desastres Naturales
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
%H	Porcentaje de Humedad
H ₂	Hidrógeno
Hg	Mercurio
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
KCl	Cloruro de Potasio
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
ml CH ₄ /g SV	Mililitros de metano sobre gramos de sólido volátil
NADF-020-AMBT-2011	Norma Ambiental para el Distrito Federal. 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.
NMX-AA-15-1985	Norma Mexicana. Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de cuarteo.
NMX-AA-120-SCFI-2016	Norma Mexicana. Que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas.
NMX-AA-180-SCFI-2018	Norma Mexicana Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.
NMX-AA-33-1985	Norma Mexicana. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de poder calorífico superior
NOM-001-SECRE-2003	Norma Oficial Mexicana-Calidad del Gas Natural.
NH ₃	Amoníaco
NH ₄ ⁺	Amonio
ORP	Potencial de óxido reducción
pH	Potencial de Hidrógeno
PBM	Potencial Bioquímico de Metanización
RME	Residuos de Manejo Especial
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RP	Residuos Peligrosos
SEMA	Secretaria de Ecología y Medio Ambiente del estado de Quintana Roo
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
ST	Sólidos Totales
ST/SV	Sólidos Totales sobre Sólidos Volátiles
SV	Sólidos Volátiles

RESUMEN

La invasión periódica y masiva de sargazo que han recibido, en los últimos años, las costas caribeñas mexicanas se estima que continuará incrementando y expandiéndose en un futuro próximo. México, aún no puede lidiar con este problema que ha originado notables daños económicos, sociales y ambientales en la región. Actualmente se requiere obtener información para la reutilización y reducción de altos volúmenes de la macroalga. Se ha estudiado la optimización de la producción de biogás a partir del sargazo usando pretratamientos y co-digestión, aunque su potencial como sustrato bioenergético parece prometedor, aún existen retos asociados a su aprovechamiento. El presente trabajo planteó la evaluación del sargazo como sustrato potencialmente valorizable a través del proceso biotecnológico de digestión anaeróbica en co-digestión con fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU). También se exploró la presencia de posibles compuestos tóxicos que pudieran limitar su aprovechamiento. Para lograr el objetivo se valoró la producción de biogás en muestras de sargazo recolectadas en el estado de Quintana Roo México, co-digeridas con muestras de FORSU e inóculo proveniente de la Planta de Composta de Bordo Poniente en la Ciudad de México, a través de la determinación de las características físicas y químicas necesarias para aplicar la prueba del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM) bajo distintas relaciones de sólidos volátiles (SV) entre los co-sustratos y pre-tratamiento como pre-lavado. La tendencia de producción de biogás y de metano del sargazo en co-digestión con FORSU relación 1:2 SV mostró mejor rendimiento, aunque menor a lo esperado. Considerando que el contenido de As en el sargazo es alto, es posible que el consorcio microbiano del inóculo tenga afectada su eficiencia de biodegradación. Las características del digestato obtenido muestran su potencial aplicación como fertilizante. No obstante, dada la heterogeneidad observada en el sustrato y la variabilidad en la producción de biogás; se requiere profundizar en el estudio para robustecer los datos obtenidos.

ABSTRACT

The periodic and massive invasion of sargasso that the Mexican Caribbean coasts have received in recent years is estimated to continue increasing and expanding in the near future. Mexico, can not deal with this problem that has caused significant economic, social, and environmental damage in the region. Information is currently required that supports the reuse and reduction of high volumes of this macroalgae. The optimization of biogas production from sargassum has been studied using pretreatments and co-digestion, although its potential as a bioenergetic substrate seems promising, there are still many challenges associated with this type of exploitation. The present work proposed the evaluation of sargassum as a potentially valuable substrate through the biotechnological process of anaerobic digestion in co-digestion with organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), the presence of possible toxic compounds that can limit its use was also explored. To achieve the objective, the biogas production was evaluated in sargassum samples collected in the state of Quintana Roo Mexico, co-digested with samples of OFMSW and inoculum from the Bordo Poniente Compost Plant in Mexico City, through the determination of the physical and chemical characteristics necessary to apply the Biochemical Methanization Potential (BMP) test under different volatile solids (VS) ratios between the co-substrates and pre-treatment as pre-wash. The trend of biogas and methane production from sargassum in co-digestion with FORSU 1:2 VS ratio showed better performance, although lower than expected. Considering that the content of As in sargassum is high, it is possible that the microbial consortium of the inoculum has affected its biodegradation efficiency. The characteristics of the digestate obtained show its potential application as a fertilizer. However, given the heterogeneity observed in the substrate and the variability in biogas production; it is necessary to deepen the study to strengthen the data obtained.

I. INTRODUCCIÓN

Las costas caribeñas mexicanas han sido invadidas en extrema ocurrencia por macroalgas marinas no nativas del género *Sargassum spp.*, la llegada en periodos intermitentes y en cantidades sin precedentes de esta masa pelágica, desde mediados del año 2014 y hasta la fecha, ha provocado recurrentes acumulaciones que derivan en cierre de playas turísticas, perturbación de navegación marina y cambios en el comportamiento de anidación de las tortugas marinas (Milledge & Harvey, 2016; Van Tussenbroek *et al.*, 2017; NOAA/AOML, 2018). El influjo masivo de Sargazo, está integrado principalmente por dos especies de macroalgas *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Franks *et al.*, 2016; Smetacek & Zingone, 2013) y no obstante que en mar abierto funcionan como un ecosistema transcendental que proporciona hábitat y refugio para muchos organismos marinos (Witherington, Hiram, & Hardy, 2012), su arribo a las playas genera toneladas de biomasa que resultan en notables daños económicos, sociales y ambientales en esta región.

La invasión marina del sargazo sigue incrementándose y se espera que continúe y se expanda (Marks *et al.*, 2017), se ha estimado que muchos países no están preparados para lidiar con el problema, especialmente por la ausencia de sistemas de alerta temprana (Mclawrence *et al.*, 2017), así mismo los retos actuales para establecer estrategias eficaces de control son grandes, por una parte el alto costo asociado a su impacto y al manejo de las grandes masas de las macroalgas (básicamente remoción y disposición como residuo), por otra parte la falta de información respecto a la fuente geográfica de origen, su distribución, transporte, así como métodos de revalorización son también de gran importancia (Marks *et al.*, 2017).

Las macroalgas son organismos fotosintéticos multicelulares con reproducción asexual por fragmentación (Walsh, 2019), una de sus variedades son las macroalgas pardas clase *Phaeophyceae*, orden *Fucales* que se encuentran dentro del género *Sargassum*, comúnmente conocido como sargazo. La cantidad de las especies que conforman este género va de 1,500 a 2,000, en general presentan

un desarrollo notable en las regiones frías y templadas del océano (Sitte *et al.*, 2004). Visualmente se identifican por su color marrón, amarillo o dorado y su morfología lateral en forma de hoja, estas se forman en la base del organismo con la estructura de talo y rama, además de poseer vejigas circulares únicas (neumatocistos o neumatoquistes) que se llenan de oxígeno (O₂) (Martínez, 2019 y Oyesiku, O. y Egunyomi, A., 2014) para mantenerse a flote y lograr su función de fotosíntesis.

Diversos estudios científicos han enfocado sus tareas en obtener información que apoye un manejo racional del Sargazo e igualmente derive en una rápida reducción de los altos volúmenes de un material que inicia rápidamente su descomposición al arribar a las playas. Aunque se han aplicado una gran variedad de métodos para retirarlo, disponerlo o aprovecharlo, aún no se ha descrito una solución real al problema. Algunos estudios científicos han propuesto estrategias de revalorización como el uso de procesos térmicos para recuperación de energía, otros trabajos han aplicado procesos biotecnológicos como composteo, producción de biogás, producción de biomasa para alimento animal o para la obtención de biocombustibles como el bioetanol o de productos farmacéuticos; indiscutiblemente la elección de cualquiera de estas estrategias requiere del conocimiento de las características químicas y biológicas de este sustrato. (Marquez *et al.*, 2014; Trivedi *et al.*, 2015; Valencia *et al.*, 2015; Milledge *et al.*, 2016; Sembera *et al.*, 2018).

Por otra parte, para tener una idea más clara de la dimensión del problema, se ha estimado el volumen de sargazo que arriba a las playas, los investigadores Rodríguez *et al.*, (2016), consideraron que el sargazo que recibió la costa de Quintana Roo, únicamente en los municipios de Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel, Tulúm y Othón P. Blanco, fue de 71,353 m³ de sargazo al día, lo que equivale a una recepción promedio de 318.9 m³ /km de playa al día. Datos más recientes reportados por SEMA (2018) indican que entre junio y diciembre de 2018 se presentó un volumen total de 144,959 m³ de sargazo recolectado en las playas de los municipios Benito Juárez, Cozumel, Isla Mujeres, Othón P. Blanco,

Solidaridad y Tulum. Sí bien es cierto se observan importantes variaciones en los datos reportados, es sin duda preocupante para esta región la presencia excesiva de sargazo, pues no solo se observan afectaciones ambientales de los ecosistemas marinos; también a nivel social y económico existen diversos problemas como los mencionados por León (2019) quién resaltó que el arribo del sargazo afecta a la salud pública debido a que los organismo que viven en la superficie de las macroalgas (crustáceos diminutos parecidos a las pulgas o hidrozoarios, como anemonas o aguamalas) al contacto con la piel, y dependiendo de la sensibilidad de cada persona, producen picazón, alergias o salpullido, además de otras situaciones asociadas con la descomposición de las algas que produce gases (metano (CH₄), dióxido de Carbono (CO₂) y sobre todo ácido sulfhídrico (H₂S). Otro dato de interés que menciona este autor es que el sargazo contiene también arsénico (As), metaloide que puede causar distintos efectos de toxicidad.

En cuanto a la situación turística y económica León (2019) expuso que la afectación del fenómeno impacta a la economía de México por la dependencia del turismo en la región del Caribe Mexicano que provee 15% del Producto Interno Bruto (PIB) y 14% de empleos (Milledge *et al.*, 2020). Además, la presencia del sargazo perjudica el valor de las playas, lo anterior implicó que en búsqueda de recuperar buenos niveles de turismo el gobierno de Quintana Roo y el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN) declararon en junio de 2018 al Caribe Mexicano como zona de desastre.

Las repercusiones económicas a Quintana Roo se manifiestan por la disminución de ingresos en el sector turístico, siendo ejemplo de ello el municipio de Solidaridad con disminución de un 35% durante los arribos de sargazo a sus playas en 2018 y 2019, pero también por los gastos que implica la limpieza de las mismas para los propietarios de hoteles cuya inversión oscila en los \$54,000 dólares por mes y un gasto estimado de \$120 millones de dólares por remoción de sargazo a través del Caribe de México (Milledge *et al.*, 2020).

En general toda la región de playas del Caribe Mexicano a la que arriban grandes volúmenes de sargazo tiene complicaciones por la gestión y manejo del sargazo como residuos ya que una vez retirado del océano se descompone en unos pocos días o hasta una semana produciendo un olor fétido (Walsh, 2019). Este proceso de descomposición puede ocurrir aún localizado sobre el agua del litoral si permanece por un periodo prolongado sin movilización. Con el fin de evitar impactos ecológicos dentro de las primeras acciones que se llevaron a cabo fueron el ocultar al sargazo bajo la arena o su recolección y disposición como residuos sobre las playas.

El gobierno de México, con apoyo de científicos y empresarios turísticos implementaron estrategias de contención y manejo del sargazo a través de la SEMARNAT por lo que en 2015 surgieron lineamientos que permiten disponer de las macroalgas recolectadas en la playa (León, 2019). En 2019 se publicaron los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México mientras expertos en el tema continúan definiendo una norma emergente. En los lineamientos aún vigentes se estipula detalladamente los aspectos a cumplir para ejecutar seis actividades principales: 1. Recolección de sargazo en alta mar, 2. Contención del sargazo en zonas marinas cercanas a la costa, 3. Retiro de sargazo en las barreras de contención, 4. Remoción de sargazo de la playa, 5. Manejo y disposición final de sargazo y 6. Campamentos tortugueros y zonas de anidación; esta última actividad se concentra en la preservación de las condiciones adecuadas en playas asignadas para anidación de tortugas y evitar perjudicarlas por presencia de maquinaria para recolección del sargazo, además de promover el conocimiento del manejo de esta fauna que puede estar presente entre el sargazo que se recolecte. Todas estas acciones para el control del sargazo se enfocan principalmente en mantener el buen estado de las playas e imagen turística, así como la preservación de las tortugas, todo mediante barreras físicas de contención, estrategias con equipos y personal para recolección, pero no con la implementación de un procesamiento que resulte eficaz para poder minimizar impactos negativos y además aprovechar el residuo del sargazo.

El manejo del sargazo resulta complicado debido a que la autoridad que tendrá tal responsabilidad depende de la zona en que se ubique el sargazo; es decir, en principio el sargazo sobre el mar flotando en el océano se considera como flora que se encuentra en su hábitat, pero al aproximarse a las costas y flotar sobre la zona marítima de México su manejo es de atribución federal; sin embargo al arribar a las playas y depositarse sobre la arena en el territorio se considera un Residuo de Manejo Especial (RME) orgánico por su composición y estructura, lo anterior fundamentado en su característica predominante de alto volumen y al no cumplir con características de un Residuo Sólido Urbano (RSU) o un Residuo Peligroso (RP) de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, LGPGIR, Art. 5º, fracción XXX (2018). Al ser el sargazo un RME su manejo es de atribución estatal, aunque al momento no se han generado o adaptado leyes, reglamentos o normativas formales que así consideren al sargazo; la única mención que se hace al respecto es en la actualización del año 2021 en los lineamientos técnicos y de la gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México el inciso “H”, punto 85, en el cual se establece que *“Para todas las actividades que requieran colectar sargazo en estado de descomposición en la costa, barreras de contención, sitios de transferencia y/o disposición final, éste deberá ser considerado como residuo de manejo especial susceptible de ser valorizado en apego a la normatividad aplicable...”*.

El problema descrito muestra la imperativa necesidad de tomar medidas que no solo enfoquen la contención y recolección del sargazo, sino también consideren el desarrollo de alternativas para su aprovechamiento, además de generar directrices adecuadas para su correcta gestión. En México los avances de propuestas del uso y aprovechamiento del sargazo difundidos por fuentes de noticieros, información nacional e internacional mencionan que ya existen ideas que implican el uso del sargazo para la elaboración de libretas, eco-ladrillos, elaboración de cocteles gourmet, así como su integración en el proceso de elaboración de suelas de tenis (Arse, 2019).

En este contexto, el presente proyecto plantea la evaluación del sargazo como sustrato potencialmente valorizable a través del proceso biotecnológico de digestión anaeróbica, analizando posibles compuestos tóxicos que puedan limitar su aprovechamiento como residuo.

Cabe destacar que esta propuesta también considera lo mencionado en el apartado “H” del punto 86 de los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México, actualizados en 2021 que indican que: *“Todos los procesos involucrados en la transformación de la biomasa de sargazo deberán estar alineados a un modelo de aprovechamiento sostenible, prevaleciendo el enfoque de economía circular buscando una interacción dinámica entre la industria, la academia, el gobierno, y considerando en todo momento un irrestricto cuidado del ambiente y el beneficio social y económico para las comunidades locales”*.

II. ANTECEDENTES

II.1 El arribo de sargazo a playas del Caribe Mexicano

De las diversas especies de *Sargassum spp.* dos son las de especial interés en México por la detección de su arribo a costas del Caribe Mexicano, éstas son *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, las cuáles sobreviven gracias a la circulación de agua y componentes orgánicos, estas además requieren un entorno que respalde la exposición continua a nutrientes y la eliminación de desechos. El océano sirve como el medio de crecimiento adecuado que les proporciona un sistema dinámico de agua que alberga propiedades químicas específicas en los gases y sales disueltos además de buscar zonas donde existan temperaturas más cálidas. (Fernández *et al.*, 2016).

Si bien el aspecto entre estas dos especies es muy similar, *Sargassum fluitans* se puede distinguir de *Sargassum natans* por la presencia de tejido alrededor del tallo de la vejiga y la falta de espinas en las mismas (Walsh, 2019). En lo subsecuente al referirse al conjunto de estas especies de macroalgas se empleará la

nomenclatura de las especies de seres vivos relacionadas que se agrupan en géneros por lo que se les denominará *Sargassum spp.*

El arribo de *Sargassum spp.* a playas del Caribe Mexicano de principio se consideró como un proceso natural que incluso aumentó a nivel global, pero desde la época de verano de 2011 arribaron cantidades masivas atípicas y en México se detectó un incremento para el verano de 2014 y en el invierno de 2015 (Rodríguez *et al.* 2016) de modo que, desde entonces a la actualidad persisten los arribos excesivos, principalmente en época de verano.

Adicional a lo anterior, existe el antecedente de la tendencia del arribo masivo de esta biomasa a playas de países del mar Caribe reportada durante los meses de las estaciones de otoño e invierno (Louime *et al.*, 2017), con lo que se confirma que en efecto el arribo actual es atípico.

Por otro lado, debido a que el Caribe Mexicano posee muchas riquezas naturales, la invasión vegetal del sargazo se considera una problemática biológica para sus playas y ecosistemas (en particular los arrecifes de coral) por lo que el 7 de junio de 2018 el gobierno de Barbados (que pertenece a la región del Caribe) lo declaró una emergencia nacional (León, 2019).

Lo antes descrito, en relación con los servicios ecosistémicos, que son los diversos beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad, es que entre los presentes en el Caribe Mexicano se encuentran los de regulación, apoyo y los culturales. De acuerdo con la SEMARNAT (2018) esta región cuenta con la Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano que alberga el 50% del Sistema Arrecifal Mesoamericano, de una longitud aproximada de 1000 km, se ubica al Este de la península de Yucatán, cuenta con cinco ecorregiones marinas denominadas Plataforma del Golfo de México Sur, Plataforma del Caribe Mesoamericano, Talud del Caribe Mesoamericano, Cuenca de Yucatán y Cadena Montañosa Caimán; toda esta ecorregión fue declarada un área natural protegida el 7 de diciembre del 2016 (CONABIO, 2010).

En lo que respecta al Sistema Arrecifal Mesoamericano en Quintana Roo, este abarca los municipios de Isla Mujeres, Benito Juárez, Tulum y pasa frente a las costas de Puerto Morelos, Solidaridad, Cozumel, Bacalar y Othón P. Blanco; con una superficie total de 5,754 hectáreas. Por otra parte, adicional a los ecosistemas arrecifales, el Caribe Mexicano también cuenta con otros ecosistemas costeros/marinos que también son importantes como lo son los manglares y praderas de pastos marinos (Herazo y Lizardi, 2019).

Lo anteriormente expuesto es el motivo de que el Caribe mexicano sea una región de importancia ecológica que alberga variedad de biodiversidad, su relevancia se considera esencial para la función de los ecosistemas y para que estos a su vez presten sus servicios de apoyo, abastecimiento, regulación e incluso culturales; de ahí la necesidad de su protección y gestión sustentable (FAO, 2020).

II.1.El origen del sargazo que llega al Caribe Mexicano

Existen diversas hipótesis sobre la región de origen de la desorbitada proliferación del sargazo y el desfase de su llegada; dos de las hipótesis con más relevancia son las propuestas por Gower *et al.*, (2013).

La primera inicialmente se fundamentó en que el sargazo se traslada por los cambios de movimientos marinos consecuencia de variaciones en la temperatura del planeta arrastrando al sargazo desde el mar de los sargazos, su punto de origen en el planeta, hacia la zona del medio giro subtropical del Atlántico Norte.

Posteriormente, con más información al respecto, estos mismo autores restablecieron su hipótesis con una segunda opción que atribuye el origen del sargazo que llega al Caribe a la región norte del estuario del río Amazonas, frente a la costa brasileña, lo anterior por ser un potencial punto de origen desde 2011 debido a que el sargazo en esta zona no se puede atribuir al de proveniencia de la región de recirculación del Atlántico Norte puesto que existe una diferencia en la morfología de la especie de sargazo dominante entre el Caribe Oriental, la corriente de las Antillas y el sur del mar de los sargazos.

Con la información anterior Gower *et al.* (2013) coincidieron con un hallazgo en el cual indican que la concentración media de sargazo en el Caribe que llegó en 2014 fue diez veces más grande que la registrada durante el periodo de 2011-2012, además de ser 300 veces mayor que la de cualquier otro otoño en las últimas dos décadas y de diferir con los registros de ambos periodos en el mar de los sargazos, los cuales no tuvieron grandes variaciones por lo que definieron que el mar de los sargazos es oligotrófico (bajo en nutrientes), mientras que la región de recirculación del Atlántico Norte y la cuenca del Amazonas contienen varios nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) producto de actividades antropogénicas. Es por dicha característica que se infiere que es la última región mencionada es la que contribuye a la eutrofización de aguas costeras caribeñas.

Es la presencia de alto contenido de nutrientes la que aporta a la proliferación del sargazo (Rodríguez *et al.*, 2016) debido a que, tanto *Sargassum natans* como *Sargassum fluitans*, duplican su biomasa en aproximadamente 11 días, mientras que su periodo natural es de 50 días en aguas oceánicas del Mar de los Sargazos (Louime *et al.*, 2017).

Otras características en esta zona que aportan elementos para una explicación a la proliferación del sargazo es la presencia alta de salinidad, intensidades de luz (baja cobertura de nubes) y temperaturas cálidas de la superficie del mar que oscilen entre 18° C y 30° C favoreciendo su rápido crecimiento (Sánchez, *et al.*, 2018), vinculado con el que las condiciones favorecen el proceso de fotosíntesis, puesto que de manera natural ocurre por los cambios temporales en la concentración de nitrato y el rápido movimiento del agua que aumenta su velocidad para la absorción de nutrientes.

Todo lo anterior adquiere sentido y se relaciona con el registro de valores elevados de los aportes de nutrientes al río Amazonas que coinciden en la época durante la cual se reportó el incremento de sargazo en la región del Caribe desde el año 2011 (Djakouré *et al.*, 2017).

No obstante, la teoría más reciente de Franks *et al.* (2016) integra que una de las áreas de procedencia del sargazo es en efecto la correspondiente a la región de recirculación del Noreste del Ecuador cerca de la desembocadura del río Amazonas, pero añade que el sargazo se origina también en otra área del océano Atlántico tropical, esta región es frente a las costas de África ecuatorial, en el Golfo de Guinea.

II.2. Producción de biogás como una alternativa para el manejo y aprovechamiento del sargazo

Con fundamento en los problemas que implica la abundancia del sargazo en playas del Caribe Mexicano, una opción de aprovechamiento de residuos orgánicos o de biomasa, como lo es el sargazo, es procesarlo y obtener productos de valor agregado en la rama energética mediante su uso para producir bioenergía en forma de biogás. El biogás es el producto final de un proceso denominado digestión anaerobia, el cual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, es de tipo biológico, complejo y degradativo que por acción de microorganismos en los materiales orgánicos o biomasa de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos finalmente en biogás (FAO, 2011).

El biogás está conformado principalmente de la mezcla de gases de metano (50-75 vol. %) y de dióxido de carbono (25-50 vol. %), aunque también contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros gases traza (Hengevoss *et al.*, 2017). Al final del proceso se obtiene también otro producto conformado de una mezcla acuosa de materiales sólidos, conocido como digestato, mezcla rica en nutrientes, minerales y compuestos biológicamente activos, que puede ser utilizado como fertilizante o mejorador de suelos (Ramos, 2014).

El proceso de digestión anaerobia consta de cuatro etapas bioquímicas en las que se llevan a cabo transformaciones y poseen características específicas para generar biogás. De acuerdo con Gerardi (2003) y Ramos (2014), son las que se mencionan a continuación.

Hidrólisis: Etapa en la que las macromoléculas orgánicas complejas que conforman el material a degradar, tales como lípidos, carbohidratos y proteínas, son transformadas a compuestos orgánicos simples o monómeros (azúcares simples, ácidos grasos y aminoácidos, respectivamente) que servirán de sustrato para la siguiente etapa. Esta transformación se origina por medio de exoenzimas de bacterias hidrolíticas facultativas (pueden sobrevivir tanto en condiciones aerobias como anaerobias).

Acidogénesis: En esta etapa los compuestos orgánicos simples producidos durante la hidrólisis se transforman, mediante las bacterias acidogénicas, en una serie de productos intermedios, principalmente ácidos orgánicos volátiles como el ácido propiónico ($C_3H_6O_2$), ácido butírico ($C_4H_8O_2$) y ácido valérico ($C_5H_{10}O_2$). También pueden generarse otros ácidos orgánicos como el ácido láctico ($C_3H_6O_3$) o alcoholes como el etanol (C_2H_5OH). Otro ácido que se produce es el ácido acético (CH_3COOH) y además una fase gaseosa con contenido de dióxido de carbono (CO_2) e Hidrógeno (H_2).

Acetogénesis: En esta etapa las bacterias acetogénicas transforman los compuestos formados en la etapa anterior en ácido acético (CH_3COOH), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), los principales precursores del metano (CH_4). Esta etapa se logra mediante bacterias acetogénicas que junto a la acidogénesis dan lugar a los únicos compuestos que pueden ser metabolizados por las bacterias metanogénicas. Se requiere de una concentración baja de H_2 , de lo contrario la reacción sería inhibida por bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno. El consumo de hidrógeno es realizado por los microorganismos metanógenos que además pueden ser inhibidos por una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles, compuestos que sirven de sustrato para las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno.

Metanogénesis. Es la etapa efectuada por las bacterias metanogénicas, pertenecientes al reino de las arqueas. Las arqueas (*Archaea*; *et: del griego αρχαία [arjaía], «las antiguas»*), a veces llamadas árqueas, son un gran grupo de microorganismos procariotas unicelulares que, al igual que las bacterias, no

presentan núcleo ni orgánulos membranosos internos, pero son fundamentalmente diferentes a estas, de tal manera que conforman su propio dominio o reino. Estas bacterias son estrictamente anaerobias, una pequeña concentración de oxígeno es capaz de inhibirlas. Es en esta fase donde verdaderamente se produce la estabilización de la materia orgánica, el ácido acético (CH_3COOH) pasa a metano (CH_4), el cual es prácticamente insoluble en agua y se separa rápidamente de la fase acuosa en forma de gas. También en esta etapa se forma dióxido de carbono (CO_2) que escapa en forma gaseosa o es convertido en bicarbonato. La primera vía de transformación es llevada a cabo por las bacterias metanogénicas acetoclásticas, mientras que al segundo grupo de bacterias se le denomina hidrogenotróficas.

II.3 Viabilidad de la digestión anaerobia con sargazo como sustrato

Actualmente para México representa una problemática el que lleguen toneladas de sargazo a las playas, sin embargo, existen antecedentes como los encontrados en la revisión de Marquez *et al.* (2014) en la que muestran cómo es que en países como Filipinas se analizan opciones para cultivo de camas de algas para insumo de producción de biogás.

Entre las algas estudiadas y que demostraron buena viabilidad para altas tasas de reproducción se encuentra el *Sargassum spp.*; por lo que este género de macroalga en efecto es un sustrato candidato para ser empleado en digestión anaerobia al utilizar todos los componentes degradables (carbohidratos, proteínas y lípidos) de la materia prima para producir biogás y utilizarse como combustible en motores de combustión interna y gas de cocina. Otro hallazgo importante de esta revisión es que la producción de biomasa de macroalgas pelágicas se facilita por poseer la característica de estar desarraigadas del suelo marino y aprovechar que se desarrollan en las orillas del mar facilitando el lavado de las plantas antes de su uso, además de ser compatibles con pastos marinos en su uso para la producción de biogás.

La digestión anaerobia es un proceso incluido en una de las tecnologías de tratamiento de residuos que parte del término “Waste-to-Energy” por lo que tiene

gran potencial de aplicación en países en vías de desarrollo para aprovechamiento del contenido energético de residuos de composición orgánica (Hengevoss *et al.*, 2017).

Para el caso del sargazo, la digestión anaerobia contempla aprovecharlo y adicionalmente ofrecer una alternativa de su manejo para su disposición final; pero a pesar de lo anterior y de que la digestión anaerobia ya es un proceso muy estudiado, la aplicación de esta técnica a nuevos sustratos, como lo es el *Sargassum spp.* (mezcla de ambas especies que arriban al Caribe Mexicano), requiere de una investigación previa para estudiar las particularidades que puede presentar el proceso debido a que buena parte del desarrollo de la digestión anaerobia se condiciona por el sustrato (Arhoun, 2017).

Cuando un determinado sustrato que necesita degradarse presenta una deficiencia o un exceso de algún tipo de nutriente, o no cumple por completo con los parámetros iniciales para mejorar la producción de contenido de metano en el biogás, existe la posibilidad de mezclarlo con otro sustrato capaz de equilibrar el contenido en nutrientes y otros parámetros. La técnica que mezcla sustratos en el proceso se denomina co-digestión anaerobia, dicha técnica permite aprovechar las sinergias existentes entre diferentes sustratos mediante el balance de nutrientes, alcalinidad, pH, etc., y de esta manera incrementar la biodegradabilidad de ambos sustratos y la producción de biogás (Arhoun, 2017).

Relacionado con lo anterior, las algas de género *Sargassum spp.* tienen un alto contenido en proteínas y su co-digestión con sustratos de alto contenido de Carbono- Nitrógeno (C/N) puede ser una alternativa prometedora para aumentar el rendimiento de contenido de metano en el biogás (Oliveira *et al.*, 2014), también existen ventajas substanciales como las altas tasas de crecimiento que las algas poseen (Park, *et al.*, 2011). En cuestiones de condiciones de operación, Márquez *et al.* (2014) mencionan que la temperatura sugerida para la digestión anaerobia con algas como sustrato es en un rango de temperatura mesofílica, de 35°C, puesto que las macroalgas ofrecen un buen equilibrio en la optimización de la producción de metano. Para la temperatura de un proceso termofílico, a 55°C,

aumenta el riesgo de la inestabilidad del biorreactor. Con la información descrita y los resultados de estudios previos, que muestra la Tabla 1, se detectaron algunas referencias que aluden a la producción de biogás y a evaluaciones del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM) bajo diversas condiciones de operación o experimentación con macroalgas de diferentes géneros, así como algunos casos con el género *Sargassum spp.* y en específico a las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*. De las especies se detectaron pocos datos, por lo cual existe una gran área de oportunidad para complementar su caracterización fisicoquímica.

Adicional a la información que brinda la Tabla 1, para obtención de rendimientos de metano con el sargazo sus propiedades físicoquímicas son relevantes para conocerlo, diversos autores reportan lo que se presentan en la Tabla 2. Si bien estos parámetros son necesarios para conocer al sustrato e identificar su viabilidad de degradación en el proceso de digestión anaerobia, es requerido generar un perfil físicoquímico con mayor extensión que permita conocer más a fondo las propiedades del sargazo. Para tal fin se detallarán en el apartado de metodología todos los parámetros propuestos en esta investigación para determinar las propiedades fisicoquímicas de estas macroalgas.

Así mismo se infiere que debido a la ausencia de un perfil más completo y por los datos de rendimientos mostrados en la Tabla 1, el sargazo requiere co-digerirse con otro sustrato en el proceso de digestión anaerobia.

Un sustrato que es candidato por las aportaciones en el proceso de co-digestión es la FORSU. Este sustrato se caracterizó anteriormente por este equipo de investigación, por lo que ya se cuenta con resultados de referencia de su PBM y además es un sustrato que como materia prima en el proceso a mayor escala podría tomarse de la generación diaria en regiones dónde se localizan municipios afectados por llegada del sargazo en el estado de Quintana Roo. Algunos de los municipios afectados por sargazo fueron reportados en la cuantificación de sargazo de los estudios de Rodríguez *et al.* (2016) y en los reportes de la SEMA (2019), estos municipios son Benito Juárez, Cozumel, Isla Mujeres, Othón P. Blanco, Solidaridad y Tulum (6 de 10 municipios que integran el estado de

Tabla 1. Antecedentes de rendimientos de metano obtenidos con digestión anaerobia de Sargazo.

macroalga Género/especie	Proceso			Referencia
	Condiciones y temperatura de operación	Rendimiento	Lugar de estudio	
<i>Sargassum</i>	Prueba de Potencial Bioquímico de Metanización.	120-190 ml CH ₄ /g SV	No especificado	Barbot, Al-Ghali, y Benz (2016)
		140 y 280 ml CH ₄ /g SV		
<i>Sargassum sp.</i>	Prueba de Potencial Bioquímico de Metanización.	119 y 380 L CH ₄ /kg SV	Portugal (Braga)	Olivera, Alves, y Costa (2014)
<i>Sargassum fluitans</i>	Proceso mesofílico (37°C) durante 30 días.	346 ml CH ₄ / g SV	Islas de Santa Lucía y Granadinas	Gray y Morrison (2017)
	Condiciones de operación no especificadas, aplicaron pre-tratamientos y co digestiones.	450 L CH ₄ /kg SV	Filipinas	Márquez <i>et al.</i> (2014)
<i>Sargassum fluitans</i> y <i>Sargassum natans</i>	Prueba de Potencial Bioquímico de Metanización. Proceso mesofílico (38°C) durante 29 días. Pre tratamiento con hongos para degradación de celulosa.	104 L CH ₄ /kg SV	México (Yucatán)	Tapia <i>et al.</i> (2018)
<i>Sargassum fluitans</i> y <i>Sargassum natans</i>	Experimentos con sargassum en mezclas de las 3 especies de <i>Sargassum</i> dominantes y separadas: <i>S. natans</i> VIII, <i>S. natans</i> I and <i>S. fluitans</i> independientes.	* <i>Sargassum natans</i> VIII: 145 ml CH ₄ / g SV. * <i>Sargassum natans</i> I: 65.8 ml CH ₄ / g SV. * <i>Sargassum fluitans</i> : 112.7 ml CH ₄ / g SV.	Isla Turcos y Caicos-Territorio británico (Al sureste de las Bahamas)	Milledge <i>et al.</i> (2020)
<i>Sargassum</i>	Pre tratamiento hidrotermal, operación a condiciones mesófilas (35°C) durante 21 días.	116.72 ±2.14 ml CH ₄ /g SV	Nueva Zelanda, muestreo en Barbados	Thompson <i>et. al.</i> (2020a)
<i>Sargassum fluitans</i> y <i>Sargassum natans</i>	Pre tratamiento hidrotermal y co-digestión anaerobia con residuos alimenticios. Operación a condiciones mesofílicas (35°C) durante 21 días.	292.18 ± 8.70 CH ₄ ml/gVS	Nueva Zelanda, muestreo en Barbados	Thompson <i>et. al.</i> (2021b)

Tabla 2. Características físico químicas del sargazo determinadas por otros autores.

Referencia	Especie o género	Parámetros analizados										
		Humedad (%)	Lípidos (%)	Carbohidratos (%)	Lignina (%)	Celulosa (5)	Hemicelulosa (%)	Proteínas (%)	Fibra (%)	Cenizas (%)	ST (%)	SV (%)
Márquez <i>et al.</i> (2014)	<i>Sargassum spp.</i>	11.16	0.75	41.81	19.27	-	25.73	10.25	9.84	26.19	-	-
Barbot, Al-Ghali, y Benz (2016)	<i>Sargassum</i>	79-90	0-2	30-50	-	-	-	7-12	-	18-53	-	-
Tapia <i>et al.</i> (2018)	<i>Sargassum fluitans y natans</i>	-	-	-	15.6	31.2	10.5	-	-	35.5	-	-
Gray y Morrison (2017)	<i>Sargassum fluitans</i>	-	-	-	-	-	-	3.3	-	22.4	-	-
Olivera, Alves, y Costa (2014)	<i>Sargassum sp.</i>	-	2.73	-	4.6	-	-	23.6	-	-	89.5	53.8
Thompson <i>et al.</i> (2020a)	<i>Sargassum</i>	20.63	-	-	-	-	-	-	-	31.82	79.30	37.84

Quintana Roo) y que coinciden también con los municipios reportados en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en el Estado de Quintana Roo 2009-2011 donde se reporta que existen generaciones aproximadas de 1,631.85 toneladas diarias de RSU en el estado, de las cuáles en su mayoría son dispuestos en tiraderos a cielo abierto.

Conviene subrayar que 1,598.35 toneladas generadas son provenientes de cuatro de los seis municipios afectados por arribo de sargazo, de los cuales únicamente

los residuos de los municipios de Benito Juárez, Cozumel y Lázaro Cárdenas son depositados en rellenos sanitarios construidos apegados a la normatividad aplicable. Adicionalmente se debe considerar que la porción en porcentaje masa que corresponde a la FORSU generados en los diferentes municipios oscila entre el 28.14 y 57.6 % masa, por lo que sería una fuente de insumo de sustrato para el proceso de co-digestión anaerobia.

Por consiguiente, si se obtienen resultados con la evaluación del PBM se puede establecer la información que permita dar origen a la idea de escalar el proceso con un biodigestor en alguna de las zonas de afectación por arribo de sargazo y en caso de considerar esta opción otro beneficio de incorporar al proceso la FORSU es que en época diferente al verano, época en la que el sargazo no arriba en cantidades tan elevadas, el proceso con la FORSU como sustrato puede mantenerse para la producción de biogás.

En virtud de los resultados que se obtengan en este trabajo de investigación se puede elaborar una propuesta para considerar la oportunidad de mejorar las estrategias de manejo integral de los RSU en los municipios de Quintana Roo y para generar directrices normativas y jurídicas adecuadas para el manejo de residuos del sargazo. Aunado a la situación, de acuerdo con Márquez *et al.* (2014), el biogás es una fuente renovable de preferencia para comunidades rurales que permitiría aprovechar sus RSU pero también los RME provenientes del sargazo pudiendo incluso plantear utilizar el biogás generado en el proceso como fuente de combustible o para producir electricidad y utilizar el otro producto del proceso (digestato) como fertilizante o un mejorador de suelos de acuerdo con algunos de los requisitos que establece la NADF-020-AMBT-2011.

II.4. Marco normativo para el manejo del sargazo

Este apartado tiene como objetivo mostrar un breve análisis del marco normativo vigente en el cual podemos ubicar al sargazo como residuo, esto para poderlo identificar y dar sentido a su aprovechamiento como residuos. Cabe destacar que no se encontró referencia expresa del sargazo y su manejo integral, es por ello que para este trabajo de investigación se partirá de que el sargazo es un residuo

orgánico (por su estructura vegetal) y porque arriba al estado de Quintana Roo en grandes volúmenes, lo que de acuerdo con el artículo 5° fracción XXX de la LGEEPA corresponde a un Residuo de Manejo Especial (RME). La legislación y normativa que se analizó fue en materia ambiental, en especial las referentes a residuos, las jurisdicciones que se analizaron fueron la federal, estatal y municipal estas se muestran con mayor detalle en la Tabla 3. Con esto se denota que la clasificación del sargazo como residuo se considera un problema en el marco legal al tener ausencia de normatividad para su correcta gestión y manejo, por lo tanto, es necesaria la inclusión del sargazo como residuo.

Tabla 3. Marco normativo para el manejo del sargazo en México.

Jurisdicción	Ley/Reglamento/Norma	Artículo (s) aplicable(s)
Federal	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Artículos: 4° y 115°, fracción III, inciso "C".
	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Artículos: 3°, fracciones XXXII y XXXIII; 5°, fracción XXX.
	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Título segundo, artículos: 7°, fracción VII; 9° fracción III y 10°.
Estatal	Ley para la Prevención y la Gestión Integral de Residuos del Estado de Quintana Roo	Artículo 8°, fracciones XXXIX y XLI.
	Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los Residuos del Estado de Quintana Roo	Artículos: 8°, fracciones V, VII; Sección IX, artículos 75° y 76.
Municipal	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 (CDMX).	No aplica

III. HIPÓTESIS

Las macroalgas del género *Sargassum spp.* que arriban al Caribe Mexicano en co-digestión anaerobia con la FORSU aumentan la producción de biogás comparado con la digestión anaerobia del *Sargassum spp.* como único sustrato.

IV. OBJETIVOS

IV.1 Objetivo general

Evaluar el Potencial Bioquímico de Metanización de muestras de sargazo recolectado en una playa del Caribe Mexicano, bajo condiciones de pre-lavado y en co-digestión con FORSU.

IV.2 Objetivos particulares

1. Muestrear sargazo que arribe a una playa del Caribe Mexicano dentro del mar y sobre la playa de acuerdo con la NADF-020-AMBT-2011.
2. Caracterizar la composición físicoquímica de las muestras de sargazo recolectado.
3. Muestrear la FORSU e Inóculo en la planta de composta de Bordo Poniente de la Ciudad de México.
4. Determinar el Potencial Bioquímico de Metanización (PBM) (producción y composición de biogás) del sargazo crudo, con o sin pre-lavado y mezclado con FORSU.
5. Evaluar la calidad del digestato producto del mejor esquema de co-digestión identificado, para valorar su uso como un mejorador de suelos o fertilizante de acuerdo con la NADF-020 AMBT-2011.

V. METODOLOGÍA

V.1 Diseño del estudio

Para direccionar las actividades que proporcionen los resultados para probar la hipótesis postulada de este trabajo de investigación, se propuso la estrategia que se muestra en la Figura 1. La investigación se fundamenta en la realización de una caracterización físicoquímica del inóculo, la FORSU, y el sargazo como sustratos en co-digestión anaerobia para con ello evaluar el Potencial Bioquímico de Metanización (PBM) bajo distintas relaciones de sólidos volátiles entre los co-sustratos y tratamiento con pre-lavado, esto último con la intención de retirar excedentes de arena en el sargazo que pueda interferir en el proceso.

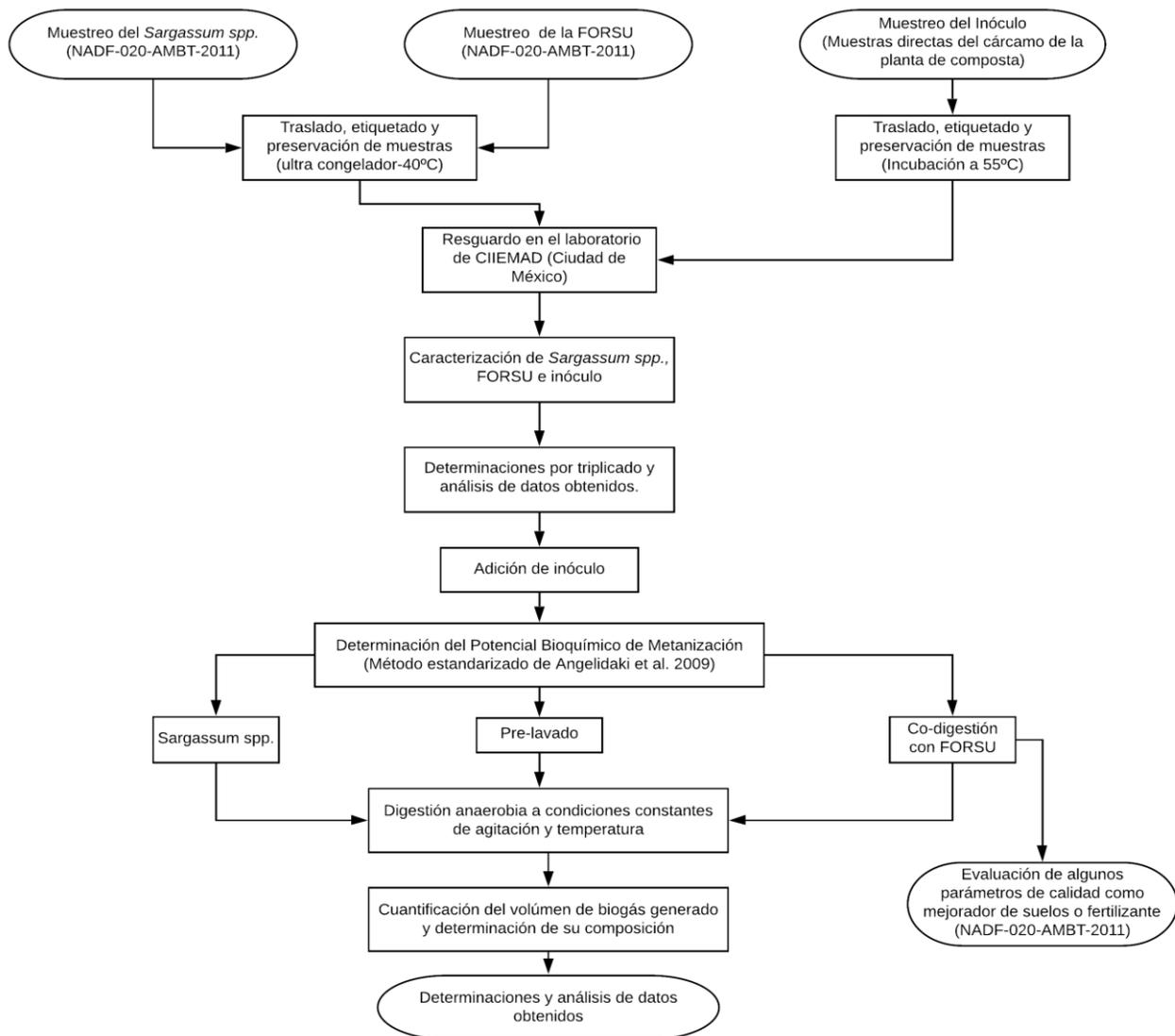


Figura 1. Diagrama esquemático del diseño del estudio de investigación.

Asimismo, al subproducto de la co-digestión conocido como digestato se le determinaron algunos parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad, ORP, %H, %SV, %ST y contenido de metales pesados para verificar sus valores de acuerdo con la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-020-AMB-2010 (Norma Ambiental para el Distrito Federal. 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) para determinar su calidad y así definir su uso como un fertilizante o mejorador de suelos.

Si bien la Figura 1 muestra un panorama general de los pasos fundamentales para lograr el objetivo principal y los particulares de este trabajo de investigación, se describirán más adelante brevemente los diversos métodos ejecutados para el muestreo y para cada determinación de la caracterización fisicoquímica del sargazo, la evaluación del PBM y la caracterización del digestato.

V.1.1 Área de recolección, sitios de muestreo, muestreo, preservación y preparación de submuestras.

La biomasa de sargazo fue recolectada en playas del estado de Quintana Roo, México localizado en el Caribe Mexicano, esta región constituye uno de los ambientes marinos más importantes del país que incluye arrecifes de coral, praderas de pastos marinos, lagunas costeras y manglares. La principal actividad económica del estado es el turismo (Sánchez *et al.*, 2012). En la Figura 2 se presenta el mapa de la zona donde se recolecto el Sargazo.

Esta playa es de libre acceso y se encuentra en Puerto Juárez, puerto conocido como el “barrio de pescadores” debido a que las lanchas de los pescadores de la zona son ancladas en este sitio además de ser conocido por la atracción gastronómica de platillos con pescados y mariscos frescos. Así mismo este puerto es concurrido por turistas para tomar el ferri de la empresa de transporte “ultramar” que los traslada a Isla Mujeres. Predominan las palapas con pequeños restaurantes locales; sin embargo, no existe algún hotel contiguo a esa playa y por tanto no existen programas de recolección permanente de sargazo. Lo anterior permitió que la zona de estudio no presentara interferencias por limpieza del sargazo al momento de la recolección de las muestras. Las condiciones de localización de la playa facilitaron vincular la afectación sobre sus características sociales, ambientales y económicas por la presencia del sargazo. En cuanto a lo social, la playa “El niño” cumple con la característica de ser una de las más



Figura 2. Mapa de ubicación de la playa “El niño”, zona de muestreo, estado de Quintana Roo, fuente elaboración propia, adaptación de SEMA (2018). Google earth.

concurridas por habitantes de la zona al ofrecer un ambiente familiar, con atracción de gastronomía local y además la cercanía al Puerto Juárez y al embarcadero del Ferri, medio de transporte a las islas aledañas a la costa. También cuenta con los servicios básicos de salvavidas, establecimientos de comercio de alimentación principalmente, área de palapas y buen acceso por su cercanía a la carretera A Punta Sam. Por otro lado, en el ámbito ambiental, la playa “El niño” presenta cúmulos de sargazo sobre la arena que inician un proceso de descomposición rápido e incluso propician un cambio de coloración en el agua cercana a la línea de costa por su descomposición (Walsh, 2019). En el ámbito económico la presencia de sargazo es un problema por la reducción de visitantes que prefieren no acudir a las playas de aspecto desagradable debido a la presencia del sargazo reflejándose en una disminución de consumo local y en consecuencia menos ganancias monetarias de comerciantes de la zona y pescadores.

V.1.2. Recolección, preservación y preparación de muestras de sargazo

Como primera fase el muestreo de *Sargassum spp.* en Quintana Roo y el de la FORSU en la Ciudad de México, se realizó de acuerdo con lo descrito en la NADF-020-AMBT-2011 que en su apartado 7.1 Metodología de muestreo, indica que: “La toma de submuestras debe hacerse en puntos equidistantes, horizontal y verticalmente, de modo que todas las alturas y profundidades en un lote, tengan la misma oportunidad de quedar representada” para así conseguir una muestra homogénea derivada de submuestras. Esta norma ambiental aplica para el sargazo y la FORSU debido a que, aunque es exclusiva para composta, esta norma fundamenta su muestreo en la NMX-AA-15-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de cuarteo, pero tiene un enfoque a los Residuos Orgánicos, tal como lo es el sargazo al ser de origen vegetal y que al acumularse en las playas se convierte en un residuo orgánico de gran volumen. La aplicación de la NADF-020-AMBT-2011 permitió recolectar muestras compuestas homogéneas derivadas de submuestras o muestras individuales, estas muestras se recolectaron en dos medios: sobre la playa y dentro del mar y además en ambos casos se realizó a la mitad de las muestras individuales de cada medio un lavado con agua de mar en el sitio de muestreo. En ambos medios de recolección se consideró un esquema adecuado para tomar las muestras.

Se recolectaron muestras en el mes de julio de 2020, se obtuvieron un total de 4 muestras compuestas de 1 kg cada una. La recolección de muestras sobre la playa se ubicó en la playa “El niño” localizada a unos metros del Puerto Juárez con coordenadas 21°11'36.4"N y 86°48'22.1"W. Las primeras 8 muestras simples de 250 g cada una se recolectaron aleatoriamente, primero se recolectaron 4 sobre la playa, en un montículo de sargazo y se procedió a lavarlas con agua de mar para retirar el exceso de arena que pudiera interferir en el proceso de co-digestión y las otras 4 sin lavado. Para el caso del muestreo del sargazo flotando sobre el mar se hizo un viaje en lancha del Puerto Juárez a Isla mujeres, en este viaje se hizo una parada en la distancia intermedia de la distancia

de estos dos puntos es decir punto medio de la distancia entre Puerto Juárez a Isla Mujeres, donde se aprovechó la oportunidad para tomar las muestras simples de sargazo que conformaron otra muestra compuesta de 1 kg del sargazo flotando sobre el mar que tenía aparentemente muy poca arena y posteriormente se realizó lo mismo, pero esta vez con un lavado previo con agua de mar en el sitio de muestreo. Posteriormente se recolectaron otras 8 muestras simples de distintos puntos aleatorios del sargazo que flotaba sobre el mar (antes de llegar a la playa), 4 de estas muestras fueron previamente lavadas con agua del mar para eliminar cualquier interferencia y las otras 4 sin lavado. En ambos casos se cuidó evitar recolectar pasto marino en vez de sargazo. Al realizar el muestreo de esta manera se procuró representar un promedio de la composición del montículo de sargazo.

Las muestras individuales se guardaron en bolsas de polietileno con cierre hermético y se etiquetaron con la identificación de la muestra, fecha y hora de muestreo, temperatura ambiente del día de toma de muestra y la ubicación GPS (coordenadas) del sitio de muestreo. Previo a la homogenización y el cuarteo se procedió al almacenamiento de las muestras individuales a -4°C en un congelador de refrigerador casero, para el traslado a la Ciudad de México se guardaron las muestras en bolsas negras a la menor temperatura posible y para evitar un tiempo más prolongado sin estar en refrigeración se trasladaron por transporte aéreo. Al llegar a la Ciudad de México se colocaron inmediatamente en refrigeración de nuevo hasta llevarlas en una hielera al laboratorio del CIEMAD. Cada muestra compuesta recolectada sobre la playa con y sin pre-lavado se constituyó finalmente por 1 kg aproximadamente cada una, mismo caso para la muestra compuesta recolectada flotando sobre el mar con y sin lavado.

Para la homogenización de las muestras simples de cada condición de recolección y tratamiento (pre-lavado) se procedió a mezclar las bolsas que contenían cada muestra simple y así conformar una muestra compuesta. Una vez homogenizadas las muestras simples procedentes de cada medio de recolección se realizó un cuarteo; es decir, de la porción total de la mezcla sobre una superficie se dividió

en cuatro partes con porciones equivalentes, de éstas cuatro porciones dos fueron descartadas (las de la esquina superior derecha y la esquina inferior izquierda).

De las porciones seleccionadas se generó la muestra compuesta con que se trabajaron los resultados obtenidos al momento. Cabe destacar que aunque el método de cuarteo para homogenización de muestras descarta dos de las cuatro porciones de la mezcla de muestras simples, en este caso por escasez de sargazo se reservaron en congelación en caso de requerirse para determinaciones posteriores y no tener posibilidades de realizar un nuevo muestreo debido a la restricción por la pandemia de COVID-19.

Las cuatro muestras compuestas, procedentes de la recolección sobre la playa y dentro del mar con y sin enjuague respectivamente, se guardaron en bolsas de polietileno con cierre hermético de 1 kg, se etiquetaron y se almacenaron a -40°C en el ultra congelador del laboratorio en CIEMAD. La muestra compuesta recolectada sobre la playa y dentro del mar se empleó fresca para las pruebas de pH, ORP, humedad, sólidos totales, volátiles y para la prueba de PBM.

Para las determinaciones de celulosa, poder calorífico y digestiones para metales pesados se procedió a descongelar, secar, triturar en un polvo fino y guardar en frascos plásticos nuevos con tapa (estas determinaciones se hacen en base seca).

V.1.3. Recolección, preservación y preparación de muestras de FORSU

En la zona federal del ex-lago de Texcoco se localiza el relleno sanitario Bordo Poniente, su extensión es de aproximadamente 1,999 hectáreas (ha) y aunque actualmente ya está clausurado, su Planta de Composta aún continúa en operaciones.

La Planta de Composta de Bordo Poniente (PCBP) está ubicada en el kilómetro 3.5 de la autopista Peñón-Texcoco (Nájera *et al.*, 2010), ésta planta de composta es la más grande de las ocho plantas de composta en la Ciudad de México (Gállego *et al.*, 2019). Cuando fue el cierre de operaciones de la IV etapa del relleno sanitario de Bordo Poniente, en 2011 se establecieron las condiciones para separar residuos orgánicos, ampliaron las instalaciones y la capacidad de

operación de la Planta de Composta de Bordo Poniente aumentando su capacidad de procesamiento de 200 toneladas al día hasta un promedio de 2,500 toneladas diarias en 2012 (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2016).

La recolección de las muestras de FORSU en la PCBP, permite obtener una muestra representativa y homogénea de la composición de la FORSU debido a que los camiones de transferencia de la ciudad de México trasladan los residuos del mismo día en que fueron recolectados y proceden de diferentes puntos de generación. Aunque el estado con problemática de arribo de sargazo es Quintana Roo, en este estado el estudio realizado por Salazar y Hernández (2018) arrojó que el sistema de disposición final de residuos en el municipio de Benito Juárez (mismo municipio dónde se localiza la playa “El niño” dónde se muestreó el sargazo) requiere fortalecerse, lo anterior para un mejor funcionamiento debido a que la cantidad de residuos que se generan en el municipio no es ingresada completamente al relleno sanitario. El ingreso de todos los residuos al relleno sanitario permite que se destinen a un sitio controlado y evitar que se depositen en lugares no autorizados; esto considerando que el municipio no cuenta con un programa de aprovechamiento de residuos orgánicos.

Debido a las carencias antes detectadas y que otro impedimento para muestrear FORSU generada en el municipio de Benito Juárez es que el acceso a un relleno sanitario del municipio sería complicado al no tener permiso para ingresar, se optó por muestrear en la Planta de Composta de Bordo Poniente a la cuál es más fácil obtener el permiso para ingresar como investigación del CIEMAD. La composición de la FORSU de la Ciudad de México con la de Quintana Roo suponemos no presentará gran variación al solo requerir residuos vegetales y no incluir cárnicos para fines de esta investigación.

El muestreo de FORSU e inóculo se realizó en septiembre de 2020 y en el mes de febrero de 2021 para el conjunto de experimentos desarrollados. La recolección de las muestras se realizó bajo el mismo esquema de la NADF-020-AMBT-2011 sobre la pila de composta que se estaba construyendo el día de muestreo. Las pilas de composta en la planta son de aproximadamente de 3 metros de altura y

para lograr la toma de muestras individuales se recurrió a la misma estrategia de la recolección de sargazo, es decir se tomaron de forma aleatoria sobre la pila muestras individuales de aproximadamente 500 g, se guardaron en bolsas de polietileno con cierre hermético con su respectivo etiquetado y se trasladaron a preservación en el ultra congelador del laboratorio del CIEMAD.

V.1.4. Recolección, preservación y preparación de muestras de inóculo

En la PCBP también se muestreó el inóculo que es el líquido que contiene microorganismos metanógenos activos. El inóculo se traslada a través de las canaletas del sistema de control de escurrimientos de aguas pluviales de la planta, por lo que el sitio más adecuado para recolectar las muestras fue en la pileta de la salida del sistema de escurrimiento o cárcamo (Figura 3) con el uso de un muestreador de agua residual para transferir el líquido recolectado a frascos plásticos de capacidad de un litro con tapa hermética.



Figura 3. Recolección del inóculo.

Con la finalidad de obtener muestras homogéneas del inóculo se utilizó el muestreador de aguas residuales para recolectar la muestra líquida de la mitad hacia la superficie de la profundidad total de la pileta de salida del sistema de control de escurrimientos de aguas pluviales; al tomar la muestra de esta forma se evitó obtener sedimentos sólidos que se arrastran con el inóculo. Con la ayuda de un embudo se vertió el inóculo a los frascos de plástico, se limpiaron con papel absorbente, se cerraron, etiquetaron y guardaron en la hielera de poliestireno que tenía en el interior la bolsa de plástico grueso para evitar posibles derrames en el

traslado de las muestras al laboratorio de CIEMAD. Después de la recolección y el traslado las muestras se mantuvieron preservadas en el laboratorio del CIEMAD en una incubadora a 55°C. Previo a su caracterización e implementación en la prueba de PBM el inóculo se estabilizó por un periodo de dos semanas para desgasificarse, proceso necesario para que la actividad microbiana que aún tiene materia orgánica suspendida como sustrato en el propio inóculo agote en medida de lo posible este sustrato y se evite mayor producción de biogás producto de esta actividad y no la del sustrato que se evaluará. El muestreo de inóculo se realizó en septiembre de 2020 y febrero de 2021.

V.1.4. Selección de parámetros fisicoquímicos para sargazo, inóculo y digestato

En cuanto a las diversas determinaciones de los parámetros fisicoquímicos de *Sargassum spp.*, se generó un perfil integral que aportará información de su comportamiento como sustrato en el proceso de digestión anaerobia y también esta información será de utilidad para la implementación del sargazo en cualquier otra tecnología o alternativa que se pueda plantear para su aprovechamiento.

La selección de los parámetros fisicoquímicos para caracterizar al sargazo se hizo con base en la existencia de una serie de parámetros fisicoquímicos fundamentales en un sustrato debido a que éstos pueden afectar la cinética de las diversas reacciones de las que se compone la digestión anaerobia y en consecuencia influir en la producción de biogás. Entre estos parámetros, Ramos (2014) menciona a los nutrientes elementales para el desarrollo de microorganismos del proceso como Carbono y Nitrógeno, elementos vitales para la formación de nuevas células, si no se encuentran en cantidades suficientes y en proporciones adecuadas el proceso de digestión anaerobia puede verse afectado al decaer el crecimiento de los microorganismos. Por otro lado, Ramos (2014) también considera a la temperatura y el pH como dos parámetros que influyen en el contenido de amonio porque puede encontrarse en forma iónica (NH_4^+) o como molécula estable (NH_3), siendo esta última la forma más tóxica para las bacterias metanogénicas al pasar las membranas celulares libremente. De acuerdo con

Rajagopal *et al.* (2013) en procesos de digestión anaerobia mesofílicos, y un cambio de pH neutro (7) a básico (8), el nivel de NH_3 puede aumentar 8 veces más. Lo anterior ocurre en mayor proporción en procesos bajo condiciones termófilas, temperatura de 55°C ; debido a que la temperatura influye en la constante de disociación del nitrógeno amoniacal. El pH en el proceso de digestión anaerobia debe tener un intervalo entre 6.5 y 7.6. El pH es además un parámetro base del potencial redox y las condiciones de operación del proceso como también lo son la agitación, tiempo hidráulico de retención y la carga orgánica.

En cuanto a las condiciones de operación para la producción de biogás, Oliveira *et al.* (2014) mencionan que es importante la inexistencia de compuestos ajenos a la composición del sustrato en el proceso de digestión anaerobia; éstos compuestos pueden ser adquiridos en el medio en que se colectó el sustrato. Algunos de estos compuestos pueden ser concentraciones altas de azufre, sales y sobre todo metales pesados, que de acuerdo con la cantidad en que se encuentren pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos.

En el caso específico de *Sargassum spp.*, Fernández *et al.* (2016) reportaron su capacidad para bioacumular metales tóxicos como Hg, Pb, Cd, Ni y Cr.; de aquí la importancia de también evaluar al digestato (producto líquido del proceso de digestión anaerobia) como fertilizante o mejorador de suelos de acuerdo con lo establecido por la NADF-020-AMBT-2011 y así verificar si excede o no el límite máximo permisible de parámetros como lo son el pH, temperatura, humedad, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y contenido de metales pesados, los métodos de prueba para realizar una caracterización del sargazo, inóculo y FORSU, se describen en la Tabla 4.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada método empleado para las determinaciones de parámetros fisicoquímicos que se reportan en los resultados.

Tabla 4. Métodos de prueba de parámetros fisicoquímicos para caracterización del *Sargassum spp.*

Parámetro	Método de prueba propuesto	Referencia
pH	Medición potenciométrica (suspensión acuosa)	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005.
Conductividad eléctrica	Medición conductimétrica (suspensión acuosa)	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005.
Porcentaje de humedad	Gravimetría y secado	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005.
Potencial de óxido reducción (ORP)	Medición directa a muestra con extracto en estado líquido	Sin referencia, método predefinido por equipo
Sólidos totales	Calcinación en mufla	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005.
Sólidos volátiles (Materia Orgánica, para carbono orgánico)	Pérdida por calcinación a 550 °C	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005.
Potencial Bioquímico de Metanización (PBM)	Volumen de gas generado	Angelidaki <i>et al.</i> , 2009.
Lignina*	Digestión H ₂ SO ₄ al 72%	Modificación estandarizada norma TAPPI-T 222 om-02
Poder calorífico superior e inferior	Método de prueba para RSM bomba calorimétrica	NMX-AA-33-1985
Determinación de metales pesados	Digestión de muestras por calentamiento en placa	Método EPA 3052

Nota: La mayoría de los métodos ya están estandarizados en el laboratorio del CIEMAD, los identificados con un asterisco (*) están en proceso de adaptación y pruebas preliminares para su posible uso.

V.1.4.1. Determinación de pH, potencial de óxido reducción (ORP) y conductividad.

Para realizar esta determinación el fundamento es de acuerdo al método establecido por Sadsawka *et al*, (2005), en este método se realiza una suspensión 1:5 de las muestras con agua destilada; sin embargo para el caso del sargazo en base húmeda el volumen que equivale solo a un gramo ocupa un buen volumen del vaso de precipitados y por tanto para que el volumen final de la suspensión permitiera la cuantificación de los parámetros se empleó una suspensión 1:20; es decir a cada gramo de sargazo se le agregaron 20 ml de agua destilada. Esto se realizó por triplicado en inicio con las muestras de sargazo recolectadas sobre el mar con y sin enjuague. Para el caso de la FORSU en base húmeda se agregaron 2 g de muestra y 20 ml de agua destilada. Todas las suspensiones se llevaron a agitación por 20 minutos a 180 rpm. Posterior a esta etapa se utilizó el sobrenadante, para lo cual se llevaron a centrifugación en tubos falcon de 40 ml por 20 min a 1500 rpm. Una vez con el sobrenadante se procedió a la medición de pH y ORP con el medidor de Hanna Instruments modelo HI98194, el medidor fue previamente calibrado con soluciones de pH de 4.0, 7.0 y 10.0.

Para la conductividad se empleó el medidor de Hanna Instruments modelo TDS HI 991301. Para el caso del inóculo y el digestato (una vez concluido el proceso) se procedió a medir los mismos parámetros, pero fue directo sin suspensiones para pH y ORP. Únicamente para el caso de conductividad se realizó suspensión 1:40, es decir 1 ml de inóculo y 39 ml de agua destilada para no exceder la lectura de conductividad con el medidor.

V.1.4.2. Determinación de % de humedad y sólidos volátiles

En esta determinación se emplearon cápsulas de porcelana a peso constante, se agregaron 2 g de muestra de sargazo recolectado sobre el mar con y sin pre lavado, además de la FORSU y en el caso del inóculo se añadieron 11 ml; cada muestra se hizo por triplicado. Las capsulas pesadas previamente con las muestras húmedas se llevaron a la estufa a $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

V.1.4.3. Determinación de sólidos totales

Con las muestras que salieron de la estufa y previamente pesadas se llevaron a la mufla para someterlas a una temperatura de 550°C por 2 horas. Finalmente, una vez enfriadas se pesaron para sacar el último valor requerido para procesamiento de datos.

V.1.4.4. Determinación de % de lignina

Este método fue de acuerdo con la TAPPI, 2006. Es una prueba gravimétrica de digestión ácida en reflujo cerrado de 4 horas.

V.1.4.5. Determinación de Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS, PCI)

El procedimiento fue apegado a la NMX-AA-033-1985- Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de poder calorífico superior. La muestra empleada fue seca y pulverizada.

V.1.4.6 Determinación de metales pesados en sustratos y digestatos

El método EPA 3052, digestión de muestras por calentamiento en placa para análisis multielemental por espectrofotometría de absorción atómica por aspiración directa y por generación de hidruros (As y Hg) a niveles de concentración de traza.

V.1.4.7 Determinación del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM)

Dentro de los métodos de prueba mencionados en la Tabla 4, el método para determinar de PBM de Angelidaki *et al.*, (2009) es la determinación crucial de este trabajo de tesis debido a que proporcionará información sobre la biometanización del sargazo como sustrato específico, dicha información es de utilidad para determinar la cantidad de metano factible de obtener de esta biomasa marina y el efecto sinérgico en co-digestión con la FORSU. Dicho método se seleccionó ya que se deriva de ensayos de PBM preparados por el grupo de trabajo; su adaptación emplea como controles un blanco positivo que contiene inóculo y celulosa (papel filtro), así como un blanco negativo con inóculo y agua. Tanto para los controles y las muestras a procesar el método sugiere realizar por triplicado cada mezcla y así desarrollar el análisis estadístico, sin embargo, para este

trabajo de investigación de co-digestiones se realizaron como mínimo el duplicado y se analizarán las tendencias de producción de biogás y metano.

El montaje de las pruebas fue en un set de experimentos con viales de volumen total de 125 ml, pero el volumen de operación es de 60 ml con un espacio libre de cabeza de 65 ml para que se pueda almacenar el biogás que se produzca y así evitar que por un volumen de operación mayor el biogás se disuelva en el digestato por presión en el envase. Los viales se sellaron con septas de goma y anillo de aluminio para lograr la posterior extracción de muestra de biogás y la purga del mismo.

El proceso de co-digestión anaerobia se lleva a cabo utilizando la incubadora modelo Lab Tech LSi-3016 que opera a 55°C, por lo que es una digestión de tipo termófila (Vanegas, 2015) y agitación constante de 70 rpm por un periodo de 35 días. La temperatura y agitación se definieron preliminarmente con pruebas realizadas anteriormente en el equipo de investigación y fue comprobada como la mejor a la que responde el inóculo procedente de la PCBP y en menor tiempo de producción.

Para el montaje del set de experimentos las relaciones elegidas para los sustratos (sargazo y FORSU) fueron de acuerdo con Esposito (2012) y Raposo (2011), de donde se propusieron las relaciones 2:1, 1:2 y 1:1. Para preparar los viales se les introdujo la cantidad de sustratos e inóculo que corresponden según los SV de cada sustrato, los valores promedio de SV del set de experimentos analizado se presentan en la Tabla 5.

La memoria de cálculo del Anexo I muestra un ejemplo del tratamiento que se le dieron a los datos para generar esta Tabla. Cabe destacar que a pesar de que el tratamiento de datos se enfocó en varias de las relaciones de sólidos volátiles entre el sargazo y FORSU, siempre se respetó que estas mezclas quedarán relación 1:1 con el inóculo debido a que anteriormente se observó que es la mejor relación en la que funciona el inóculo utilizado en el proceso.

Tabla 5. Promedio de sólidos volátiles añadidos en el set de experimentos de los sustratos e inóculo.

Prueba	Promedio % SV añadido	g SV añadidos de sustratos(s)
Blanco positivo (inóculo y celulosa)	99.7	0.5
Blanco negativo (inóculo y agua)	44.1	-
FORSU	90.4	0.6
SM	91.2	0.2
SML	77.5	0.5
SM_FO 1:2	73.6	0.9
SML_FO 1:2	72.4 ± 14.2	0.8 ± 0.2

***Nota:** Los valores de la Tabla que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto por duplicado.

Nomenclatura:

SM=Sargazo sobre el mar sin pre lavado

SML: Sargazo sobre el mar con pre lavado

FORSU= Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2= Sargazo sobre el mar sin pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2= Sargazo sobre el mar con pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

Una vez definidas las cantidades de sustratos e inóculo a añadir en cada vial se procedió a realizar el montaje de los mismos. A continuación, en la Figura 4 se muestra un diagrama general del procedimiento general para el montaje de los viales de la prueba de PBM.

Un detalle importante del proceso es que los viales se sellan con la septa, cinturón de aluminio y se procede a purgarlos con helio para extraer el aire que quedó en su interior al cerrarlo; de esta forma se busca generar el ambiente anaerobio. La purga se realiza introduciendo la aguja de suministro del He y otra en el otro lado de la septa que será la de salida, esta puede ser de cualquier jeringa. Una vez que

se tienen las agujas de entrada y salida se suministra el He a un flujo constante a 20 psi por unos 10 o 15 segundos; se extrae la segunda aguja de salida y se deja ingresar He únicamente con la aguja de suministro para dejar dentro del vial el espacio de cabeza con ausencia de aire y promover las condiciones anaeróbicas del proceso.

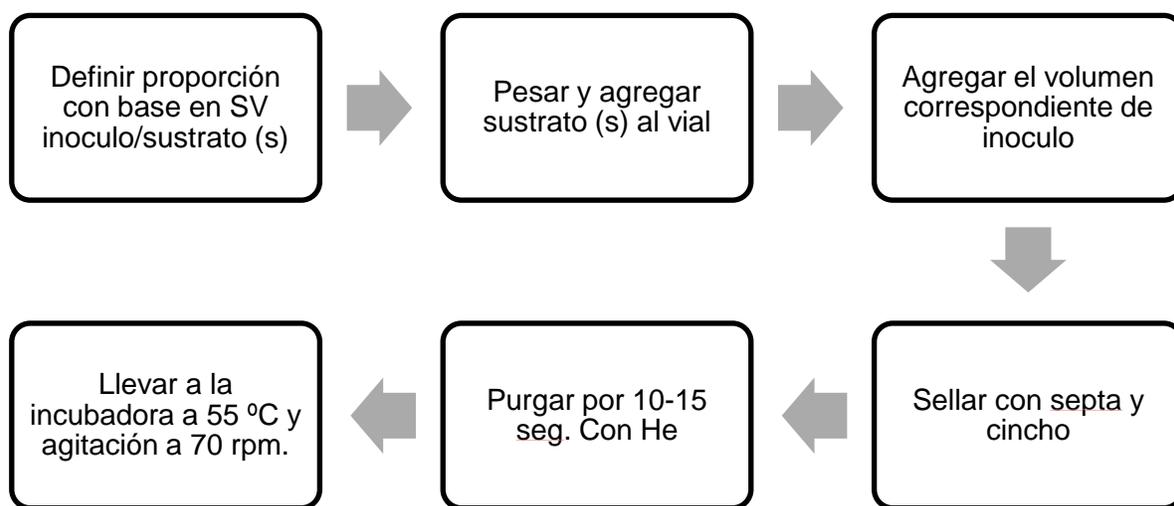


Figura 4. Diagrama general del proceso de montaje de viales de co-digestiones y controles del experimento.

En cuanto al monitoreo se evaluó composición de biogás y el volumen generado del mismo. La primera parte que consiste en evaluar composición es mediante el cromatógrafo de gases (Autosystem Perkin Elmer) equipado con un detector de conductividad térmica (TSD) y una columna empacada de 12' de largo, 1/8'' de diámetro externo y 0.086'' de diámetro interno, soporte de acero inoxidable y material de empaque Porapak QS (Alltech). El gas de arrastre es He grado cromatografía (Praxair); para la inyección de muestras se emplea una jeringa especial para gas de precisión (Vici Preciscion Lok). El monitoreo del proceso fue al inicio con lecturas 2 veces por semana, posteriormente para mejorar la curva de monitoreo del PBM se realizaron lecturas cada tercer día del proceso.

La toma de la muestra de biogás en cada vial consistió en extraer con la jeringa 2 ml, liberar 1 ml y el ml restante se inyectó al equipo de cromatografía de gases. Con asistencia del software "Clarity Chromatography SW" se traducía la

información en cromatogramas con 3 picos que representan el porcentaje de N_2 , CH_4 y CO_2 ; además el software indica el volumen de inyección leído con respecto al volumen de la curva de calibración del método; este dato es de importancia puesto que, para el tratamiento de datos se requiere transformar los resultados a condiciones estándar (Anexo II).

La cuantificación del biogás en cada vial se realizó por desplazamiento de columna; es decir, en una tina se colocaba agua y se llenó una probeta de 100 ml. Una vez llena se colocaba con la boquilla sobre la tina de agua para generar vacío sin que el agua contenida saliera. Entre la boquilla de la probeta y la tina se colocó una manguera de diámetro de 0.5 cm con una aguja adaptada en un extremo, este extremo se conectaba a la septa de cada vial para que fluyera el biogás y por desplazamiento sustituyera al agua contenida en la probeta (Figura 5) y así registrar el volumen desplazado en ml, lectura que equivale al biogás contenido en el vial.



Figura 5. Cuantificación del volumen de biogás generado por desplazamiento de columna.

En la Figura 6 se muestra el diagrama general del proceso de monitoreo de la composición y volumen de biogás de los viales.

La importancia de determinar el PBM radica en que esta prueba sirve como una herramienta para la optimización técnica y económica de las plantas productoras de biogás. Con el PBM se podrían considerar otros factores del proceso para aumentar el volumen de la prueba a nivel laboratorio o incluso predefinir información para un posterior escalamiento a un biodigestor anaerobio industrial.

Liotta *et al.* (2013) documentaron que, para lograr el montaje adecuado de un bioreactor para proceso de digestión anaerobia con un sustrato específico, es necesaria la aplicación previa de una prueba de PBM a nivel laboratorio para clasificar el proceso con base a la temperatura de operación, el contenido de sólidos volátiles (SV), tecnología de mezclado, sistema de alimentación (continuo o discontinuo), entre otras consideraciones (Massi, 2012).

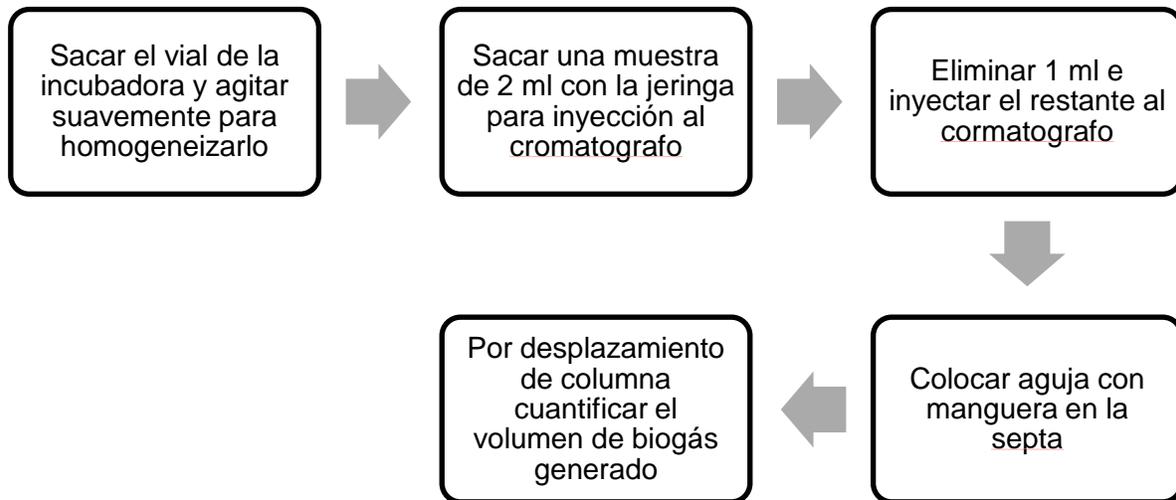


Figura 6. Diagrama general del proceso de monitoreo de composición y volumen de biogás generado.

Puesto que la técnica de Angelidaki *et al.* 2009 se fundamenta en el contenido de % SV del sustrato es importante mencionar que la relación con este parámetro y el proceso radica en que de acuerdo con el % de SV de un sustrato la digestión anaerobia, pueden clasificarse en:

Digestión anaerobia húmeda: la materia prima se mezcla con el agua además de que la concentración de materia sólida es moderada con SV menor a 15% de acuerdo con Angelonidi y Smith, (2015); mientras que Massi, (2012) reporta un rango aceptable para el % SV <10–20%. Esta configuración de digestión anaerobia suele usar tanques completamente mezclados; el uso de esta tecnología fue principalmente adoptada en el Reino Unido para procesar residuos biodegradables.

Digestión anaerobia seca: Configuración de operación en la que la concentración de materia sólida es mayor al 20– 40% de SV (Angelonidi, y Smith, 2015) y de >20–40 % SV (Massi, 2012); suelen emplear reactores completamente mezclados y por lotes además de tener menor uso de agua dulce, un balance energético más favorable y una mejor comercialización del producto final de digestato.

De acuerdo con las características anteriores se resume en una visión general de las tecnologías de digestión actuales (Fernández *et al.*, 2010) que la digestión anaerobia bajo condiciones termofílicas (55°C) y seca es más rápido, el producto obtenido es más limpio, la etapa de hidrólisis respecto al material orgánico es mejor. Además, la producción del metano es mayor con respecto a las condiciones mesofílicas (35°C) y húmeda puesto que la estabilización de digestores semicontinuos requiere largos períodos de tiempo y en muchos casos estos son incluso más largos porque el inóculo empleado no es adaptado a los residuos y / o a las condiciones ideales de funcionamiento, es decir, termofílicas y secas.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.1. Resultados de la caracterización fisicoquímica del sargazo

Para tener información precisa de las características físicas y químicas de los diferentes tipos de sustratos e inóculos de trabajo y poder establecer las cargas orgánicas necesarias para implementar el proceso de digestión anaeróbica se determinaron algunos de los parámetros que incluyen los análisis proximal y elemental de las distintas muestras del sargazo que fueron probadas, así como de la FORSU y del lixiviado de la planta de composta que se utilizó como inóculo. En la Tabla 6 se resume el valor promedio de triplicados, para cada parámetro, se presentan datos para el sargazo en las condiciones de recolección sobre el mar y sobre la playa; en ambos casos con y sin el pre-lavado. Aquí es pertinente recordar que en el diseño experimental se consideró los esquemas de co-digestión con el sargazo en estas cuatro condiciones para verificar la influencia de la presencia de arena en el proceso.

El pH en los sustratos e inóculo indican condiciones básicas, a excepción del sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado (SM) y la FORSU, los cuales indican valores ácidos. Cabe precisar que esta condición ácida influye generalmente en el proceso al inhibir la producción de biogás, en especial por la FORSU; en este caso un beneficio de la co-digestión con sargazo es equilibrar el pH del proceso y evitar la acidificación durante el mismo. Información reportada por Cheng (2018) indica que el pH óptimo para el desarrollo de las Archeas metanogénicas (principales microorganismos en el proceso de digestión) es en un pH de 6.5-8.0; siendo de esta manera que los datos de la Tabla 6 cubren el rango permitido, a excepción de la FORSU, cuyo valor es inferior a 6.0 y en este caso el mismo autor menciona que la actividad metanogénica puede ser inhibida o detenida con esos valores, algunas de las causas de la inhibición se reflejan en la actividad enzimática de los microorganismos, como lo mencionan Acosta y Obaya (2005). Estas formas generales en que influye el pH en la actividad microbiana son el cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos), alteración en los compuestos no enzimáticos del sistema al ionizar el sustrato mediante la desnaturalización de la estructura proteica de la enzima, así como el factor de la concentración de H^+ , concentración que influye en las reacciones químicas, bioquímicas y biológicas que ocurren en el sistema.

Respecto a los parámetros de conductividad y ORP, estos se toman como monitoreo del proceso, en especial el ORP se toma para verificar las condiciones en que se desarrollen las bacterias metanogénicas que determina el mayor o menor éxito del proceso por su baja velocidad de crecimiento y los estrictos requerimientos de bajo potencial redox que de acuerdo con Acosta y Obaya (2005) oscilan en los -300 mV. La conductividad en cambio es la expresión numérica de la capacidad de la muestra para transportar una corriente eléctrica, la cual depende de la presencia de iones, en este caso de la presencia de sales en el sargazo pre-lavado con agua de mar, incluso se observa un valor superior que el del sargazo sin pre-lavado.

Tabla 6. Resultados de parámetros físicos y químicos de sargazo, FORSU e inóculo.

Parámetro	SM	SML	SP	SPL	Inóculo Septiembre 2020	Inóculo Febrero 2021	FORSU
pH	6.9 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.9 ± 0.1	7.4 ± 0.2	8.9 ± 0.01	7.71 ± 0.01	4.47 ± 0.11
Conductividad (μS/cm)	55946.7 ± 1422.9	61213.3 ± 2294.5	46466.7 ± 3556.7	1467.3 ± 77.5	32160 ± 576.9	48400 ± 2593.5	43120 ± 7389.8
ORP (mV)	66.8 ± 2.3	54.8 ± 1	39.7 ± 3.8	35.5 ± 2.7	-468.1 ± 6.1	-482.1 ± 74.5	147.6 ± 5.0
% Humedad	22.3 ± 0.9	22.0 ± 0.04	22.6 ± 0.8	17.8 ± 0.4	97.4 ± 0.1	96.3 ± 0.1	77.9 ± 2.4
ST (g/kg)	801.1 ± 10.6	546.5 ± 404.6	774 ± 8.4	822.2 ± 4	26.1 ± 1.1	37.0 ± 0.6	221 ± 23.9
SV (g/kg)	730.7 ± 13.3	484 ± 358.2	659.1 ± 12.7	749.9 ± 7.5	8.7 ± 0.2	16.3 ± 0.5	201.7 ± 23.6
SV/ST (%)	91.2 ± 0.6	88.7 ± 0.4	85.1 ± 0.8	91.2 ± 0.6	33.2 ± 0.5	43.9 ± 0.8	91.2 ± 1.1
Lignina (%)	30 ± 1.7	26 ± 0.2	-	-	-	-	-
Poder calorífico superior (cal/g)	2043.9 ± 29.8	2210.1 ± 5	-	-	-	-	-
Poder calorífico inferior (cal/g)	1812.1 ± 37.6	2039.9 ± 4.1	-	-	-	-	-

Nomenclatura:

SM=Sargazo sobre el mar sin pre lavado

SML: Sargazo sobre el mar con pre lavado

SP= Sargazo sobre la playa sin lavado

SPL=Sargazo sobre la playa con pre lavado

FORSU= Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Para el caso de los sólidos volátiles (SV), que es lo equivalente a la materia orgánica que en el proceso de digestión anaerobia se degrada y es transformada a metano y de gran importancia para los cálculos de SV añadidos al sistema, se observa que tanto para los SV y ST hubo mayor variación entre los tipos de sargazo, pero en especial con el inóculo recolectado en septiembre de 2020 y febrero de 2021, esto último se puede atribuir a la fecha de recolección del mismo, ya que en septiembre de 2020 aún es época de lluvia y se presenta una dilución del lixiviado, en comparación de febrero de 2021 dónde ya era época seca. Particularmente, la relación entre SV/ST es relevante al ser el equivalente del % de materia orgánica susceptible a degradación en el proceso, estas cantidades muestran adecuados valores para los sustratos que fueron sometidos al proceso de biodigestión.

Con respecto a la lignina el sargazo con pre-lavado registró un valor ligeramente menor al de sargazo sin pre-lavado; al comparar nuestros datos con trabajos preliminares, se observó poca información en relación a este parámetro, a excepción de Tapia *et al.* (2018) quienes reportaron un 15.6% de lignina, valor superado por casi el doble para el sargazo sin pre-lavado y por un 10% para el que si tuvo pre-lavado. Para promover la degradación de la misma el cortar el sargazo al inicio del proceso contribuyó, esto porque como lo mencionó Hernández (2020) las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables por lo que se sugiere someterlas a tratamientos previos como cortado, macerado o compostado a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

En cuanto el valor de PCS y PCI López *et al.* (2020) encontraron que el PCI de la mezcla de *Sargassum spp.* fue de entre 3224.421 cal/g y 3296.075 cal/g. Para el caso de las muestras del sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado se encontró un PCI de 1812.119 ± 37.561 cal/g y para el sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado 2036.896 ± 4.07 cal/g cantidad que representa cerca de 2000 cal/g menos que lo reportado por López *et al.* (2020). Los valores comparados fueron los de PCI o poder calorífico neto, que de acuerdo con la NMX-AA-033-

1985 es el calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezcan en forma de vapor. No obstante se tendrán que tomar en cuenta otros factores como la concentración de metales en el sargazo antes de pensar en la termovalorización de los residuos de esta macro alga. Esta consideración se abordará brevemente más adelante en los resultados de metales pesados de los sustratos y digestato. Hasta el momento el valor de PCI es una referencia de la capacidad del sargazo para generación de energía eléctrica. Cabe destacar que para considerar la incineración de sargazo para generación de energía también se debe considerar que contiene al menos un 17-22 %H, cantidades que deben eliminarse para optimizar el proceso.

VI.2 Resultados del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM)

Regularmente el periodo de la prueba de PBM comprende 30 días; sin embargo, el comportamiento de estos sustratos fue conforme a la evolución de la producción del volumen de biogás que mostró mejores producciones para los esquemas de co-digestión después de los 20 días, por lo que el periodo de los experimentos se extendió a 35 días. Aunque de inicio se estableció la evaluación de sargazo recolectado también sobre la playa, los viales de sus mezclas con sustrato pre-lavado y sin pre lavar no demostraron un rendimiento alto de biogás y metano, por lo que se optó por realizar los siguientes experimentos independientes con esquemas de co-digestión que solo incluyeran sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado y con pre lavado.

Los valores de la composición de biogás y el volumen desplazado se trataron mediante una conversión de los resultados a condiciones estándar como lo indica el método de Angelidaki *et al.* (2009). Para el caso de la Ciudad de México (CDMX) y condiciones de operación se consideró en la transformación de los resultados una temperatura de 55°C, equivalente a 328K y presión de 0.77 atm. (presión en la CDMX). Para lograr estas conversiones se utilizó como herramienta el programa de office Microsoft Excel. Los detalles de las ecuaciones aplicadas

para estandarización de resultados se especifican en el Anexo II. Cabe destacar que en el procesamiento de datos se realiza la cuantificación del volumen por día de monitoreo del biogás y también de metano, sin embargo, los resultados que aportan mayor información de la prueba de este trabajo de investigación son los resultados del volumen acumulado durante los días de monitoreo, es por tal motivo que estos no se presentan con desviación estándar y por otro lado, que este trabajo de investigación fue realizado con duplicados de cada muestra del set de experimentos, de ésta manera se pudo observar la tendencia del rendimiento del biogás y metano para los controles positivos, negativos, el sargazo como único sustrato, la FORSU y los esquemas de co-digestión.

En la Figura 7 se ilustra las tendencias de los rendimientos de biogás alcanzados para el sustrato FORSU y los controles positivos y negativos con fin de visualizar el comportamiento que fue necesario monitorear en las propuestas de co-digestión. Es notorio que los controles negativos tienden a una baja producción de biogás dado su bajo contenido de SV, caso opuesto para los controles positivos e incluso la FORSU. Se puede observar también que la mejor producción de biogás para los controles positivos y la FORSU inicia en el día 15, a la mitad del periodo total monitoreado.

La proporción de metano que incluye el biogás y que refleja su rendimiento se ilustra en la Figura 8, donde se observa mayor producción en la FORSU, seguida de los controles positivos y finalmente los controles negativos; es interesante como la mayor tasa de producción de metano se observa hacia el día 17 e incluso el día 20.

Así bien se puede inferir que en la ejecución de los experimentos la FORSU tiende a una producción de biogás de hasta $586.82 \frac{\text{ml de biogás}}{\text{g SV añadido}}$ de los cuales 300.30 son $\frac{\text{ml de CH}_4}{\text{g SV añadido}}$; lo que equivale a un 51.17 % de CH₄.

Para confirmar que las tendencias de producción de biogás y metano en los controles y la FORSU son cercanas a experimentos anteriores elaborados por

colegas del equipo de trabajo se realizó un comparativo de los rendimientos acumulados reportados (ver Tabla 7).

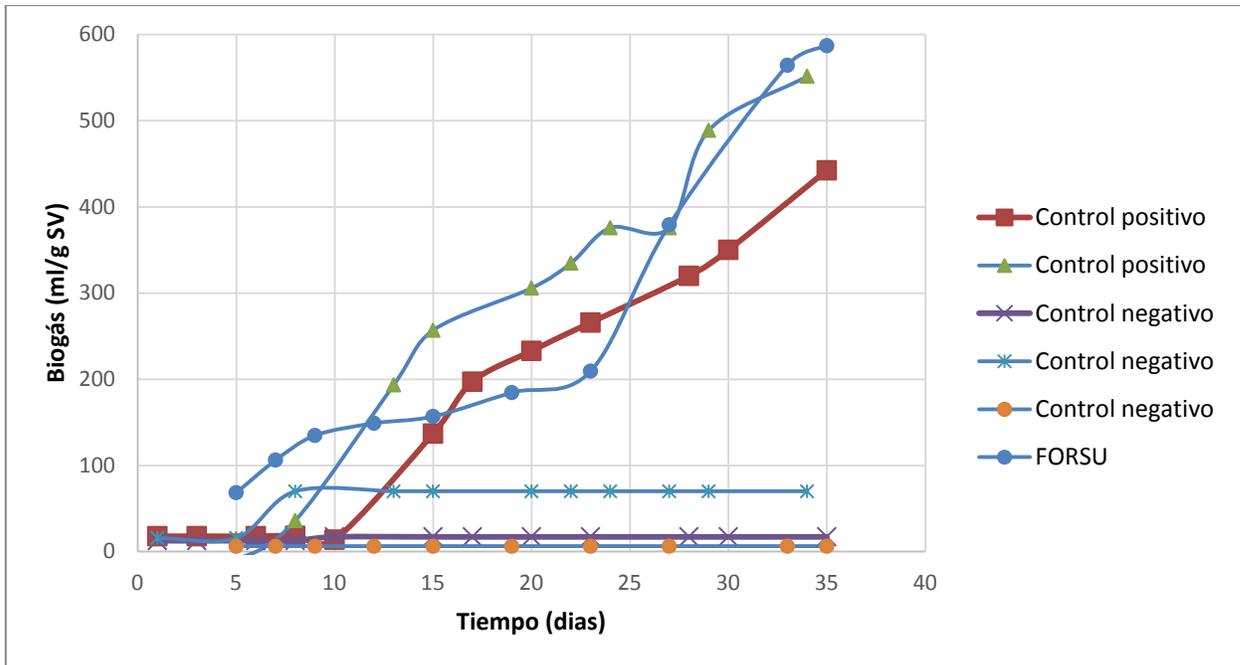


Figura 7. Tendencia de la producción de biogás en los controles y la FORSU.

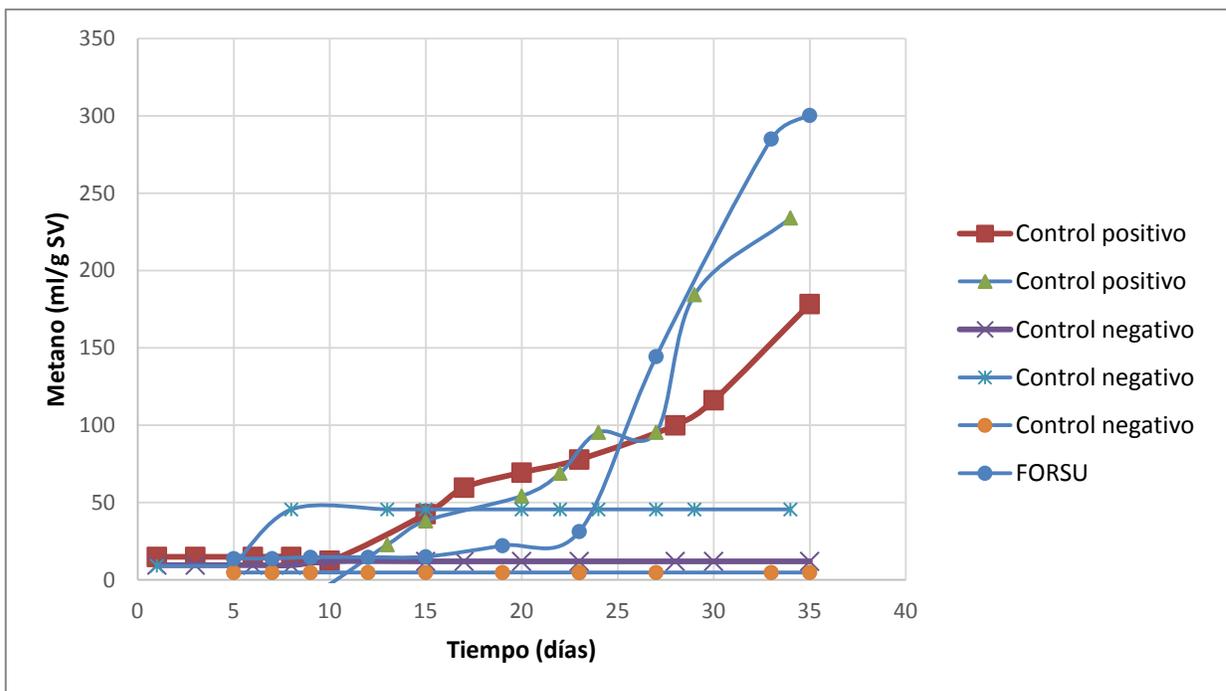


Figura 8. Tendencia de la producción de metano en los controles y la FORSU.

Tabla 7. Comparativo de datos históricos de rendimientos de biogás y metano trabajados con el mismo tipo de inóculo.

Autor	año	Periodo de proceso (días)	Rendimiento para FORSU (ml/g SV añadido)		Rendimiento para control positivo (ml/g SV añadido)		Rendimiento con control negativo (ml/g SV añadido)	
			Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
Sánchez <i>et. al</i>	2015	56	-	1080.1	-	-	-	-
Salcedo <i>et. al</i>	2017	20	188.8	-	231.5	-	29.3	-
Gállego <i>et. al</i>	2021	42	472.2	290.9	316.3 ±58.9	166.2 ±16.0	-	-
Muñoz <i>et. al</i>	2021	35	586.8	300.3	330	145.5	31.2 ± 34.0	20.7± 21.8

Los factores que comparten estos experimentos es que fueron realizados con el inóculo y FORSU procedentes de la PCBP. No obstante, el periodo de análisis de los mismos fue variable; aún con ello podemos observar que la tendencia del volumen de producción de biogás y metano de esta investigación son similares para la FORSU principalmente con lo reportado por Gállego *et. al* (2021), mientras que su control positivo es también muy similar al que reportamos en este trabajo. En cuanto al control negativo es Salcedo *et. al* (2017) quién reporta un valor muy similar al que se encontró en este trabajo de investigación. En lo que respecta al trabajo desarrollado por Sánchez *et. al* (2015) tenemos que considerar que el periodo del proceso en casi el doble de tiempo de lo que se realizó en este trabajo, por lo que toma sentido que su rendimiento de metano reportado tenga una cantidad de casi del triple de volumen en comparación del volumen que reportamos en este trabajo.

En relación a la tendencia de la producción de biogás del sargazo como único sustrato y los distintos esquemas de co-digestión se puede observar en la Figura 9 el comparativo de su comportamiento en el set de experimentos analizados.

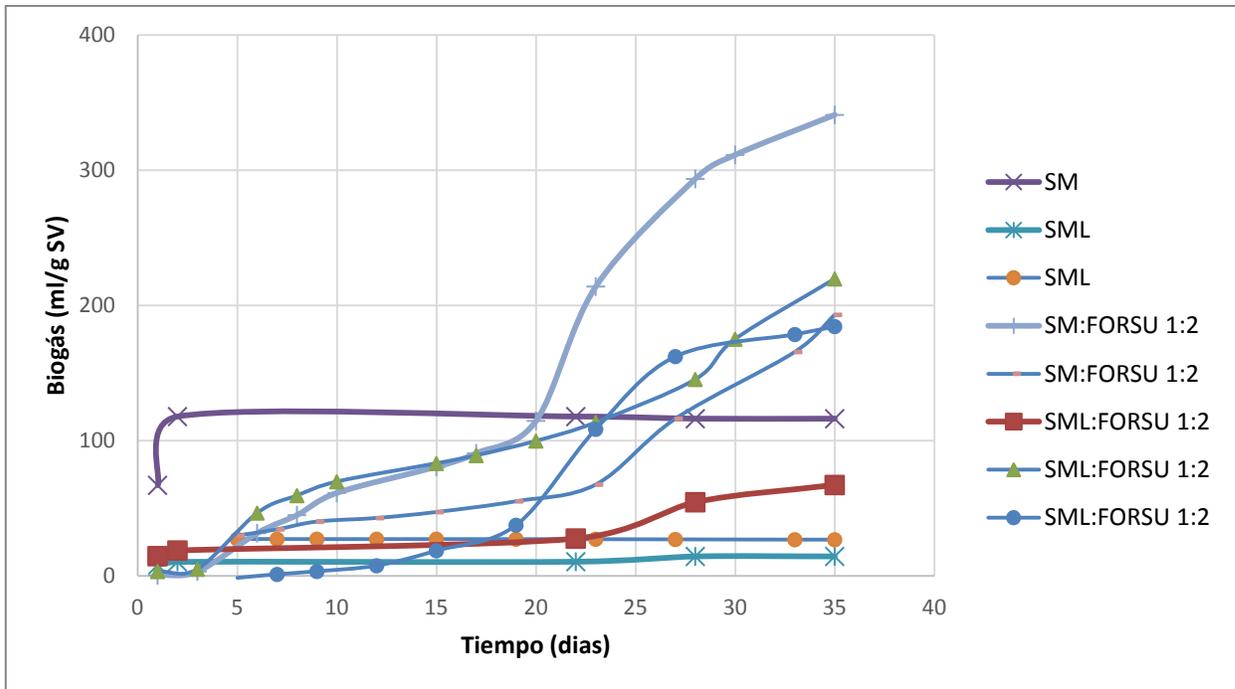


Figura 9. Tendencia de la producción de biogás en el sargazo y co-digestiones sargazo-FORSU.

Se visualiza que a diferencia de los controles y la FORSU, el día en que incrementa la producción de biogás para el sargazo como único sustrato y las co-digestiones es posterior al día 20 del periodo del proceso, e incluso se observa que el sargazo como único sustrato sin enjuague (SM) mantiene su baja producción desde los primeros 5 días de monitoreo. Así pues, para los casos de las co-digestiones se alcanza a visualizar que en un experimento el sargazo sin pre-lavado con la FORSU relación 1:2 (SM:FO 1:2) es el que presentó más producción de biogás. A pesar de esa tendencia en un experimento no se puede concretar que haya sido el mejor esquema debido a que la réplica con el otro experimento independiente no presenta una similitud en el comportamiento de la producción de biogás. Lo que sí se infiere con las tendencias presentadas es que la co-digestión relación 1:2 sargazo y FORSU es el mejor esquema propuesto y que tiene un aparente retraso en la producción de biogás además de que, en efecto, el sargazo como único sustrato no presentó los mejores rendimientos.

La tendencia en la producción de metano para los mismos esquemas de sargazo como único sustrato y en co-digestión se presenta en la Figura 10.

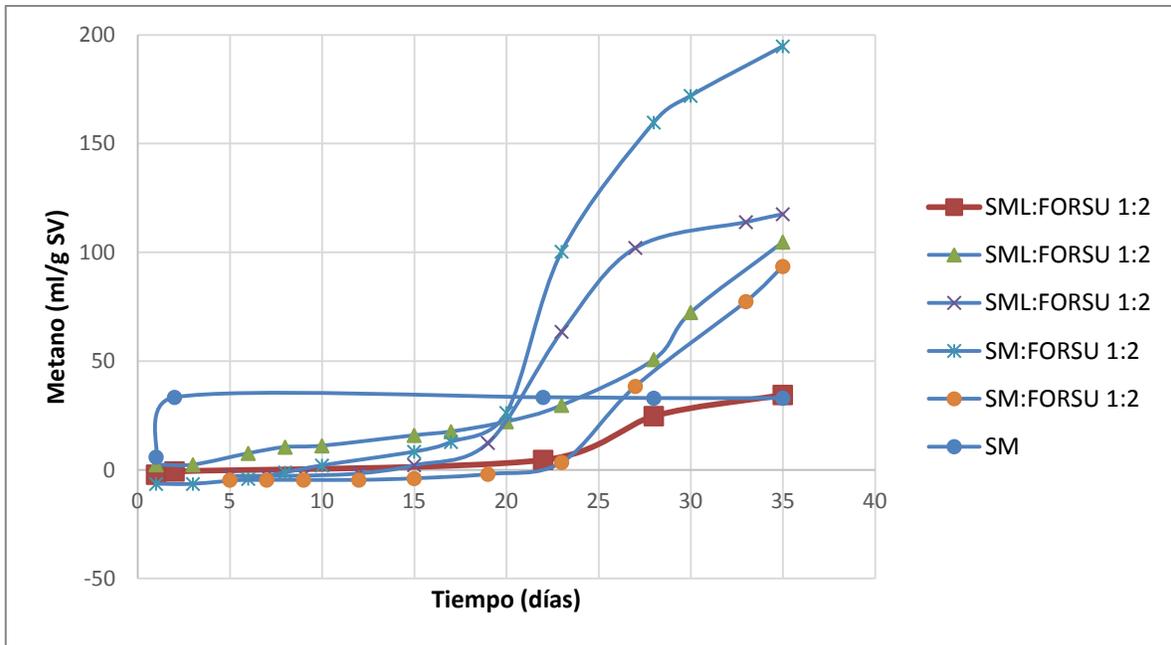


Figura 10. Tendencia de la producción de metano en sargazo y la co-digestión de sargazo-FORSU.

Con las tendencias que se visualizan en esta figura se corrobora que la producción de metano coincide con la de biogás en cuanto a periodo del proceso, alrededor del día 20. En lo que difieren las tendencias es en que con respecto a la FORSU el contenido de metano incrementó con el set de experimentos de las co-digestiones alcanzando hasta un 60 % de contenido de CH_4 en el biogás producido. A pesar de que las tendencias muestran que existe producción de biogás y metano con los esquemas de co-digestión la replicabilidad de estas propuestas puede mejorar para consolidar qué esquema es el que ofrece el mejor rendimiento de biogás y metano; es decir si con el pre-lavado o sin el mismo. Sin embargo, al momento lo que se asume con estas tendencias es que los esquemas de co-digestión muestran mejor producción de biogás y metano a comparación del sargazo “crudo” como único sustrato y que pueden mejorar la calidad del biogás con respecto a la FORSU como único sustrato incrementando hasta en un 10% el contenido de CH_4 . Por otro lado, en cuanto a las condiciones del sargazo con y sin pre-lavado no se logró consolidar cuál ofrece una mejor tendencia de producción de biogás y metano, por lo cual existe área de oportunidad para concretar si esta condición influye en la cantidad y calidad de biogás que se produzca.

Con finalidad de verificar si la tendencia del incremento de producción de biogás y metano en el esquema de co-digestión se retardan a comparación del incremento de producción de la FORSU se revisó el trabajo realizado por Thompson, *et. al* (2021b) quienes trabajaron una co-digestión con las mismas especies del sargazo empleado en este trabajo de investigación y residuos vegetales. La principal diferencia con el trabajo que ellos desarrollaron es que aplicaron un pre tratamiento hidrotérmico que les permitió que en un periodo de 21 días su producción alcanzara el máximo rendimiento de biogás y metano en los primeros 2 días del proceso, otra diferencia fue que su propuesta de co-digestión fue en relación de 25:75 en volumen de los sustratos, lo que les favoreció para alcanzar la máxima producción de biogás de $421.01 \pm 16.08 \frac{\text{ml de biogás}}{\text{g SV añadido}}$ de los cuales 292.18 ± 8.70 fueron de $\frac{\text{ml de CH}_4}{\text{g SV añadido}}$, lo equivalente a 69.40 % de CH₄.

Si bien el trabajo de Thompson *et. al*, (2021b) concreta los valores de rendimiento de biogás y metano, en su esquema de co-digestión propuesto el pre tratamiento hidrotérmico es un paso adicional que agiliza los rendimientos, lo que le da una ventaja en cuanto a tiempo de producción pero representa un gasto energético adicional para suministro del calor y presión en el pre tratamiento. Aunque en las tendencias observadas en este trabajo de investigación los rendimientos de biogás y metano se retardan hacia el día 20 de producción, se rescata que a pesar de ello el mejor porcentaje de CH₄ alcanzado fue de 60%, únicamente 9.40 % menos que la propuesta de Thompson *et. al* (2021b).

En cuanto al mejor caso de éxito reportado para producción de biogás con las mismas especies de sargazo fue el trabajo reportado por Tapia *et. al* (2018) con un rendimiento para metano de $104,000 \frac{\text{ml de CH}_4}{\text{g SV añadido}}$ con un pre-tratamiento con hongos para degradación de lignina. Con el contraste de estas comparativas se demuestra que en efecto el sargazo es un sustrato que puede producir biogás rico en metano y que los pre-tratamientos son de gran soporte para optimizar los rendimientos.

Cabe destacar que al tener una referencia de producción con otros autores no se puede aseverar que se está realizando un comparativo, es un acercamiento o aproximación de los valores que se pueden obtener aún teniendo el reporte de los valores alcanzados en condiciones estándar, esto debido a que, como se mencionó con anterioridad cada autor consideró diferentes condiciones de operación e incluso un inóculo de distinta proveniencia al trabajado en esta investigación.

VI.2.1. Calidad del biogás producido

Es pertinente abordar brevemente sobre la calidad del biogás respecto a su contenido de metano. En México la norma que menciona el contenido de metano en el biogás es la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural, donde para la zona sur el contenido de metano debe ser de 83% de volumen y para el resto del país 84%. Si bien este trabajo no se enfoca en el gas natural, estos valores de la NOM son una referencia para el biogás generado, recordando que el porcentaje de metano alcanzado en los esquemas de co-digestión no logran superar un 80% pero llegan a un 60%, sin embargo es importante mencionar que esta prueba de PBM es preliminar al escalamiento de una planta de producción de biogás, por lo que las cantidades que oscilan entre un 50% y 60% son aceptables.

VI.2.2. Relación del balance de materia en el proceso de digestión anaerobia

La importancia de considerar un balance de materia en el proceso de digestión anaerobia se deriva de que es un conjunto de reacciones biológicas interconectadas donde la materia orgánica es convertida en biogás por la acción degradativa de un consorcio de microorganismos sensibles al oxígeno, en este caso los presentes en el inóculo probado para la co-digestión anaerobia.

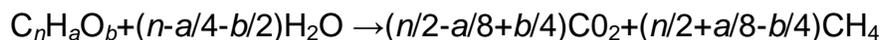
Para lograr una estimación del balance de materia es elemental la caracterización fisicoquímica del o los sustratos al ser la materia prima del proceso, esta otorga información al ser la fuente de materia orgánica, o dicho de otro modo, el alimento de los microorganismos. De acuerdo con Núñez, (2017) la materia prima es el componente más importante en el proceso de digestión anaerobia, pues se va a

degradar y convertirse finalmente en biogás, para este proceso en particular el parámetro que da mayor información sobre la materia orgánica son los sólidos volátiles que de acuerdo con el procedimiento de Angeidaki *et al.* (2009) son los que permiten calcular la concentración de los compuestos complejos que serán convertidos en biogás a través del proceso y son la referencia de la fracción biodegradable del sustrato y es a través de ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM) que se conoce el rendimiento de producción de componentes previos al metano como lípidos, proteínas y carbohidratos a partir de los compuestos complejos.

Si bien en este trabajo de investigación el balance de materia no es el eje principal de investigación si se realizó el monitoreo del sólidos volátiles del sustrato, del inóculo empleado y del digestato para conocer la reducción de los mismos. Las equivalencias de disminución de la materia orgánica por el proceso no son exactas ya que estas pruebas fueron en lote (batch) y para haber logrado una estimación más fina se requería la determinación de sólidos volátiles por cada día de muestreo y considerar además las cantidades de metano y dióxido de carbono. Cabe destacar que al haber aplicado el fundamento del método de Angelidaki *et al.* (2009), al tomar en cuenta la cantidad de sólidos volátiles del sustrato e inóculo, se realizó una equivalencia con balance de masa para verificar que la proporción de sólidos volátiles añadidos al proceso fuera 1:1 sustrato(s) e inóculo; este detalle se puede apreciar mejor en el Anexo I de este trabajo.

Puesto que la digestión anaerobia es un proceso biológico otro mecanismo para estimar un balance de materia enfocado principalmente a la conversión del sustrato a metano y dióxido de carbono es con una aproximación teórica antigua basada en una reacción de óxido reducción que además involucra agua en el proceso y que se representa mediante una ecuación empírica que considera los valores determinados en el analizador elemental del Carbono, Hidrógeno y Oxígeno del sustrato, esta ecuación es la propuesta por Buswell *et al.* (1952), dicha ecuación si es cuidadosamente aplicada puede alcanzar tasas de hasta un 95% o 100% de predicción de rendimientos.

La ecuación que se establece es la siguiente:



Así bien otro mecanismo que da mejores resultados son los modelos matemáticos ,que como enuncia Núñez (2017), permiten predecir el comportamiento de este proceso complejo cuando es sometido a diferentes condiciones de sus variables manipulables como temperatura, concentración, composición y flujo de los sustratos de entrada, nivel de pH, oxigenación, entre otro; es decir, estos modelos son enfocados en el comportamiento cinético del proceso; no obstante el propósito de mencionar estas posibilidades es para enfatizar que el alcance de este trabajo de investigación a nivel laboratorio con la determinación del PBM se apega al método de Angelidaki que monitorea únicamente la materia orgánica mediante los sólidos volátiles antes y después del proceso.

VII.1 Resultados de calidad del digestato

El otro producto de interés del proceso de co-digestión anaerobia también se sometió a las determinaciones de pH, conductividad, ORP, %SV y %ST que se presentan en la Tabla 8. Esta serie de parámetros permiten verificar la evolución del proceso a su conclusión, además de compararlos con la NADF-020-AMBT-2011 para tener una noción de la calidad del digestato para emplearlo como mejorados de suelos o fertilizante. La referencia de la norma indica una serie de parámetros para clasificar la calidad de la composta, pero los parámetros determinados y posibles de comparar para el digestato son los de %H, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, y la concentración de metales pesados permisible. A continuación en la Tabla 8 se muestra esta serie de parámetros para el set de experimentos ejecutados en digestión y co-digestión.

Tabla 8. Parámetros determinados para los digestatos del set de experimentos analizados.

Prueba	pH	CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ORP (mV)	%H	SV (g/kg)	ST (g/kg)	% SV/ST
Control positivo	8.2 ± 0.4	32660 ± 2671	-68.6	96.8 ± 0.8	9.7 ± 2.8	30.8 ± 6.5	30.3 ± 3.2
Control negativo	9.6 ± 0.3	25000 ± 1215.1	-108.8	97.6 ± 0.1	1.69	25.9 ± 3.1	17.1 ± 7
FORSU	8.2	33280	43	97.1	8.90	28.9	30.8
SM	9.4	22180	-84.5	97.9	4.21	20.9	19.1
SML	9.4	29000 ± 1216.2	-77	97.7	7.31	29.0	24.5
SM:FO 1:2	8.3	33800 ± 3479	-53.5	97.2	9.30	32.3	28.1
SML:FORSU 1:2	8.4 ± 0.4	31146.7 ± 4320.7	-9.3	97.1 ± 0.7	7.9 ± 2.7	29.0 ± 6.6	26.8 ± 3.2

***Nota:** Los valores de la Tabla que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto por duplicado.

Nomenclatura:

SM=Sargazo sobre el mar sin pre lavado

SML: Sargazo sobre el mar con pre lavado

FORSU= Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2= Sargazo sobre el mar sin pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2= Sargazo sobre el mar con pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

Antes de realizar un análisis conforme a la NADF con los parámetros que se lograron determinar es oportuno mencionar que en sí estos parámetros son monitoreados para verificar el seguimiento del proceso, de acuerdo con Vongvichiankul *et al.* (2017) son importantes para verificar las etapas del proceso de digestión anaerobia y la etapa en que se encuentra, para el caso del pH reportan que en las etapas de hidrólisis y acidogénesis el valor óptimo oscila entre 5.5 y 6.5, mientras que para la metanogénesis (etapa final del proceso) oscila entre 6.8 y 7.2. Como se puede observar en la Tabla 8 todos los valores de pH para el digestato, se encuentran en valores superiores a 7, de esta forma se puede inferir que lograron amortiguar sin acidificar el proceso y detonar una inhibición microbiana además de concluir las etapas del proceso de digestión anaerobia.

En cuanto al valor del ORP, indicador utilizado en el control anaeróbico al cuantificar los valores netos de las reacciones de oxidación en un medio acuoso, se conoce que para la digestión anaerobia los valores ideales que indica Vongvichiankul *et al.* (2017) se encuentran en un rango de entre -100 a -300 mV. Los datos obtenidos para los distintos digestatos de cada mezcla muestran que la mayoría de los valores oscilan en este rango, y aunque algunos son menores a este son negativos, confirmando presencia de condiciones anaerobias, en cuanto al valor positivo que se observa, este indica que está cercano a la oxidación, y que, de acuerdo con Salcedo *et. al* (2017), en el proceso aerobio hubo compuestos que, en ausencia de oxígeno, se utilizan como receptores de electrones al final de la cadena de transporte de electrones caso opuesto a las condiciones de una solución reductora donde, cuando no hay suficientes compuestos oxidantes en la solución, adoptará la condición de ceder electrones. Así valores cercanos a condiciones oxidantes indican que hubo un aparente proceso degradativo óptimo de los sustratos.

Con objeto de analizar qué tan bien se degradó la materia orgánica presente en cada vial se determinaron los % SV/ST en el digestato y se compararon los dos datos antes del proceso de digestión anaeróbica. Los valores de esta relación que en su mayoría de inicio al proceso oscilaban en un 80% y 90% quedaron al final del proceso entre los valores del 17% y 30%, reduciendo considerablemente la cantidad de materia orgánica que se asume fue transformada en metano.

VII.1.2. Evaluación del producto digestato respecto a la NADF-020-AMBT-2011

Es importante mencionar que para lograr una evaluación concreta del digestato conforme a la NADF-020-AMBT-2011 es necesario tener la determinación de %H, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica (ST) Carbono total, nitrógen total, relación C/N, micronutrientes, granulometría fitotoxicidad y concentraciones de metales pesados. No obstante, aunque en este trabajo de investigación no se logró realizar la determinación de todos estos parámetros se analizarán a continuación la tenendencia que tienen los que se lograron obtener.

Para el parámetro de %H, todos los esquemas de digestato superan el valor sugerido para una composta, esto porque el digestato es un producto semisólido que en su composición mayoritaria es líquido, no esto sugiere que caiga en el rango que maneja la composta de tipo C con valores de %H de 25-45%. En cuanto al pH los valores en que oscilan los diversos digestatos caen en las compostas de calidad B o C, esto al ser valores de pH superiores a 8.0. La conductividad eléctrica es el único parámetro que entra en los valores de la composta tipo A ya que las lecturas obtenidas para todas las muestras de digestato son <4 dS/m ($400,000$ μ S/cm). En lo que respecta a la materia orgánica, equivalente al %SV los valores de los digestatos son inferiores al 20% como lo indica la norma para la composta de tipo A; esto se debe a que hubo una reducción de la materia orgánica durante el proceso de co-digestión.

Como se puede observar, esta serie de parámetros es únicamente una parte de los que indica la norma para poder tener un análisis extenso y concreto del tipo de fertilizante que es el digestato.

No obstante esto da una noción de la calidad del digestato, lo ideal es tener una evaluación con todos los parámetros que ofrece la NADF, en específico se sugiere añadir también los parámetros de carbono total, nitrógeno total, relación C/N, macronutrientes (NPK), fitotoxicidad (IG) y lo que dará mayor soporte a este trabajo en especial es las concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg base seca según el tipo de composta en los que incluye As, Cd, Cr total, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn.

A continuación, en la Tabla 9 se presentan los valores obtenidos mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica para los sustratos (antes del proceso de digestión) y para los distintos digestatos del set de experimentos ejecutados con finalidad de verificar las concentraciones que alcanzaron para los elementos de Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg y As.

Antes de mencionar el análisis con respecto a la NADF-AMBT-020-2011 cabe mencionar que existe la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos, norma que

incluye concentraciones para metales pesados en biosólidos, que pueden llegarse a considerar del producto de la co-digestión anaerobia al ser líquido, con un valor de %H superior a 83%, como lo indica la NOM-004; sin embargo, estos valores son bastante laxos a comparación de los establecidos por la NADF, por lo que finalmente se optó por únicamente comparar los resultados obtenidos con la NADF que es más estricta.

Tabla 9. Concentraciones de metales pesados detectados en sustratos y digestatos del proceso de co-digestión anaerobia.

Elemento Muestra	Sustratos (mg/kg) base seca			Digestatos (mg/kg) base seca							NADF-AMBT-020-2011 (mg/kg) base seca		
	SM	SME	FORSU	Control positivo	Control negativo	FORSU	SM	SM:FO 1:2	SML:FO 1:2	Control [As]	Nivel 1-tipo A	Nivel 2-tipo B	Nivel 3-tipo C
Cu	2.2	0.8	9.9	4.2	4.2	11.4	4.1	7.795	7.3	---	70	150	400-500
Cd	1.9	2.0	0.1	2.2	2.5	2.7	1.8	2.885	2.8	---	0.7	1	3
Cr	0	0	0	2.5	2.2	3	2.4	1.725	1.5	---	70	70	250
Ni	5.6	4.9	0	14.0	15.2	16.2	14.4	16.33	15.3	---	35	60	100
Pb	13.8	16.9	3.8	21	23.2	24.8	18.6	24.715	24.4	---	45	120	200
Zn	10.5	11.5	38.9	36.2	38.2	59.4	46.0	33.8	38.9	5.6	200	500	1200-1800
Hg	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0		0.4	0.7	3
As	22.6	20.3	0.1	1.7	2.2	2.5	3.8	5.6	8.8	11.6	0.1	0.7	2

***Nota:** Valores determinados del set de experimentos analizados por duplicado para sustratos y digestatos, a excepción de la FORSU y control negativo.

Nomenclatura:

SM=Sargazo sobre el mar sin pre lavado

SML: Sargazo sobre el mar con pre lavado

FORSU= Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2= Sargazo sobre el mar sin pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2= Sargazo sobre el mar con pre lavado y FORSU relación 1:2 SV

Esta norma tiene menores tolerancias con las concentraciones de los metales evaluados, esta determinación nos puede dar noción de qué metales pueden estar presentes en el sargazo como sustrato, inclusive se observa que en la tabla 9 que

es el sargazo con y sin pre lavado antes del proceso de digestión el que muestra un concentración elevada en algunos elementos, en especial el As. Si bien este valor no puede ser comparado directamente con la norma, esta nos está indicando una referencia de la concentración aceptable. Cabe destacar que para el caso de los digestatos producto de los esquemas de co-digestión e incluso para el sargazo como el único sustrato, todos muestran aún una concentración de As, para estos casos es importante mencionar que tenemos ya una dilución de esa concentración que muestra el sargazo antes del proceso al mezclarlo con la FORSU y el inóculo.

Aún con este detalle lo que se rescata de la determinación de metales pesados es que se infiere que a pesar de existir un compuesto tóxico como el As el consorcio microbiano del inóculo logró adaptarse y mostrar rendimientos de producción de biogás y metano.

Así bien, como se mencionó anteriormente, la tendencia de la clasificación del fertilizante producto de estos esquemas de co-digestión no puede ser concretada con esta información, para ello es necesario tener mejor replicabilidad y contar con todos los parámetros señalados por la norma para ser contundente con el nivel y tipo de calidad a que pertenece el digestato, al momento estas determinaciones analizadas únicamente sugieren una noción de la clasificación.

VII.1.2.1 El As en el sargazo

Si bien el tema central de esta investigación ni es la detección y presencia del As en el sargazo se presenta a continuación una posible explicación de las elevadas concentraciones de As en el sargazo, esto se debe a que las macroalgas tienen la capacidad de alta absorción por su mezcla única de polisacáridos, principalmente alginatos en sus paredes celulares (Rodríguez *et al.*, 2020). Esta capacidad se da principalmente por el mecanismo de intercambio iónico, quelación, adsorción y atrapamiento de iones en los polisacáridos de las macroalgas; para el caso de la absorción del sargazo ocurre en el océano donde el agua tiene un pH cercano a 8.0 y la similitud entre el arsénico y otros miembros de su grupo, como fósforo y nitrógeno, permite explicar la razón por la cual el arsénico llega al sargazo. De acuerdo con García, (2014) las algas marinas absorben el fosfato presente en el

agua de mar mediante un sistema de transporte de membrana, el cual no es lo suficientemente selectivo como para discriminar entre las especies de As (V) (presente como el oxoanión diprotonado H_2AsO_4 , $pK_{2a} = 6.8$) y el fosfato (presente como el oxoanión diprotonado H_2PO_4 , $pK_{2a} = 7.2$). Es en estas condiciones donde la macroalga permite el acceso del As a su interior y reemplaza al fosfato e interrumpe los procesos de fosforilación oxidativa ocasionando un efecto tóxico. A pesar de tener la capacidad de acumular el As, las algas al ser organismos acuáticos tienen la capacidad de transformar el arsénico inorgánico en especies menos tóxicas y en el medio acuático lo transforman de As (V) en AsB.

En cuanto al hallazgo de concentraciones de As en el sargazo en este trabajo, se encontró que coincide con lo reportado por Thompson *et al.*, (2020b) y López *et al.*, (2021) quienes evaluaron el sargazo como fertilizante y alimento para ganado; ambas investigaciones manifestaron concentraciones superiores en As para emplearlo como fertilizante en cultivos de alimentos y como alimento para ganado por el riesgo que implicaría a la salud humana al consumirlos. Aunque un fertilizante con concentraciones de As representa un posible riesgo, el proceso de co-digestión muestra que hubo producción de biogás y metano a pesar de la presencia del As y una aparente disminución de las concentraciones al mezclarlo con la FORSU e inóculo. Con esto se desprende que esta técnica puede mejorarse para lograr minimizar niveles de As en el fertilizante.

VII.1.2.2 Consecuencias del As en el sargazo y el uso de otras tecnologías para su aprovechamiento

Analizaremos brevemente qué ocurriría si se empleara el fertilizante con altas concentraciones de As, para ello se requeriría remediar la contaminación del suelo mediante técnicas de remediación de suelo como lavado, fitorremediación e inmovilización complicando su aprovechamiento aumentando costos y riesgos por su uso. Otro ejemplo del uso de una tecnología de las denominadas “waste to energy” es la incineración de los residuos de sargazo, esto debido a que, aunque se transformen los residuos en energía existen problemas que representan potenciales daños al medio ambiente, y consecuentemente a la salud humana: la

producción de emisiones altamente tóxicas al aire, y la liberación de nanopartículas tóxicas que incluyen metales pesados tóxicos, dioxinas y furanos. En estas emisiones también se incluyen partículas suspendidas, en especial las provenientes de residuos orgánicos, caso del sargazo.

Además de estas emisiones existe la generación de cenizas que no son una solución al uso de rellenos sanitarios ya que estas porciones de cenizas deben disponerse incluso como residuos peligrosos según sus características CRETIB (Corrosivos, Reactivos, Explosivos, Tóxicos, Inflamables o Biológico Infecciosos).

Respecto a los residuos de acuerdo con González *et al.*, (2003) los de especial importancia medioambiental son Cd, Hg, As; estos aparecen tanto en las partículas sólidas como en la fase gaseosa. Por este motivo su retención requiere el empleo de una técnica adicional en la instalación para destruir o retener los diferentes tipos de contaminantes, además que deben cumplir los límites que fija la normatividad aplicable.

Con lo antes expuesto se infiere que, aunque en la co-digestión del sargazo permanezcan cantidades de As, de acuerdo con Thompson *et al.*, (2020b) otra alternativa que se desprende de este hallazgo es el usar el sargazo en la biosorción de biomasa de metales pesados, esto ya que se está explorando como un método rentable. Esta tecnología plantea usar la biosorción porque permitiría una rápida eliminación de estas partículas tóxicas mitigando su efecto dañino además de su potencial económico y amigable con el medio ambiente empleándolo como material biosorbente. El fundamento en que radica esta alternativa es que una ventaja de la presencia de alginatos en su pared celular es que las macroalgas de género *Sargassum* poseen grupos sulfonato que pueden remover Pb,Cu,Zn y Mn de agua residual doméstica, no obstante la presencia de sales en el sargazo puede impedir su capacidad de biosorción.

VIII. CONCLUSIONES

- Las tendencias de los rendimientos de biogás y metano en las pruebas de PBM indican que hubo producción en los controles positivos y la FORSU; la mejor producción se dio en el día 15 del proceso.
- A diferencia de los controles y la FORSU, el sargazo como único sustrato y los esquemas de co-digestión 1:2 SV retrasan su producción de biogás y metano hacia el día 20 del proceso.
- Entre el sargazo como único sustrato y en co-digestión se observó que el rendimiento de biogás y metano mejora la tendencia con el esquema de co-digestión.
- Para el set de experimento analizados con el esquema de co-digestión sargazo-FORSU relación 1:2 SV añadidos, la tendencia de producción de metano es superior por un 10% en comparación con la FORSU como único sustrato.
- El análisis de los sustratos respecto a la NADF-AMBT-020-2011 establecen una referencia en las concentraciones permitidas para metales pesados, para los valores encontrados en esta prueba se observa que para el sargazo como sustrato son superadas en el As.
- En cuanto a la calidad de digestato de acuerdo con la NADF-AMBT-020-2011, los resultados preliminares no permiten consolidar un nivel y tipo de fertilizante.
- La concentración del As que se detectó en los digestatos es superior a la concentración máxima establecida por la NADF-AMBT-020-2011, por lo que se infiere que aún con la presencia del mismo hubo producción de biogás y metano por los microorganismos presentes en el inóculo y que aún considerando una dilución de la concentración del As por la co-digestión y el inóculo se observa una disminución de las concentraciones posteriores al proceso.

IX. PERSPECTIVAS FUTURAS

- En cuanto a la ejecución de los experimentos en general se puede mejorar el diseño experimental para confirmar si las variables independiente de sargazo lavado y sin pre lavar, así como los esquemas de co-digestión tienen o no diferencia significativa en cuanto al rendimiento de biogás y metano producido.
- Se puede lograr extender la caracterización del sargazo como sustrato al obtener resultados de Nitrógeno total, amoniacal y nítrico, así como someter a las muestras en el analizador elemental con fin de tener mayor información del perfil fisicoquímico del sargazo como residuo.
- La evaluación de la NADF-020-AMBT-2011 puede concretarse al complementar la caracterización del digestato con las determinaciones adicionales de carbono total, nitrógeno total, relación C/N, macronutrientes (NPK) y fitotoxicidad (IG).

X. REFERENCIAS

- Acosta, L. y Obaya, M. (2005). La digestion anaerobia. Aspectos teóricos parte I. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XXXIX, núm. 1, pp. 35-48
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L. and Campos, J., (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water, Science and Technology-WST*. (59).5.pp.927-934.
- Angelonidi, E., and Smith, S. (2015). A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal*, 29(4), 549–557. doi:10.1111/wej.12130.
- Arce, J., (2019, 23 de junio). El sargazo, un mar de oportunidades. El Sol de México. Razón Pública: <https://www.elsoldemexico.com.mx/doble-via/ecologia/sargazo-caribe-mexicano-reciclaje-zapatos-viviendas-cambio-climatico-3791920.html>

- Arhoun, B., (2017). Digestión y co-digestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora. [Tesis doctoral. Universidad de Málaga].
- ASTM. (2016). Method of test for holocellulose in wood. Obtenido de: <http://www.astm.org/Standards/D1104.htm>.
- Barbot, Y.N., Al-Ghaili, H. and Benz, R. (2016). A review on the valorization of macroalgal wastes for biomethane production. *Marine drugs* 2016.
- Buswell, A. & Mueller, H. (1952). Mechanism of methane fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry*. 44(3), pp. 550-552.
- Cheng, J. (2018). Biomass to renewable energy processes. (2^a ed). Tylor and Francis. pp. 154-155.
- CONABIO. (2010). Informe final del proyecto CQ005 "Rehabilitación de playas públicas de Cancún, Quintana Roo".
- Djakouré, S., Araujo, M., Aubains, H., Noriega, C., and Bourlès, B. (2017). On the potential causes of the recent pelagic sargassum blooms events in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosciences Discussi*. 1-20.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A. y Pirozzi, F. (2012). Bio-methane Potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The open environmental Engineering Journal*. 5 (2112) 5-8.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations -Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Fuente: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2011) Manual de biogás. Santiago de Chile: Mi energía / PNUD / FAO / GEF. pp. 14.
- Fernández, F., Boluda, C., Olivera, J., Bolívar, L., Echavarría, E., y Gómez, A. (2016). Análisis elemental prospectivo de la biomasa algal

- acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015. *Centro Azúcar*, 44, 11-22.
- Fernández, L., Álvarez, C., Sales, D., and Romero, L. (2010). Start-up of thermophilic–dry anaerobic digestion of OFMSW using adapted modified SEBAC inoculum. *Bioresource Technology*, 101(23), 9031–9039. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.021.
- Franks, J., Johnson, D. y Ko, D. (2016). Pelagic sargassum in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*. 27 (1): SC6-SC11.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México 2016–2020. 2016, 3–62. Disponible en línea: https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/e2fbcdaadd9665d726ee6bd2195eb913.pdf (acceso el 16 abril 2020).
- Gállego, A., Salcedo, D., López, G., Nirmalkar, K., Murugesan. S., García, J., Gutiérrez, M. and Tovar, L.(2019). Microbial profile of the leachate from Mexico city’s Bordo Poniente composting plant. An inoculum to digest organic waste. *Energies* 12(12), 2343. <http://doi.org/10.3390/en12122343>.
- Gállego, K. (2021). Efecto de la bioaumentación en la generación de metano en un proceso de digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos. [Tesis doctoral. Instituto Politécnico Nacional] pp.46, 52.
- García, S. (2014). Estudios de especiación de arsénico y acumulación de metales en muestras de interés medioambiental. [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid] pp.23, 26.
- González, G. (2003). Optimización del proceso de incineración de residuos sólidos municipales. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana] pp.20, 21.
- Gower, J., Young, E. and King, S. (2013). Satellite images suggest a new sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4(8), 764–773.

- Gray, D. and Morrison, M. (2017). Anaerobic digestion economic feasibility study: Generating energy from waste, sewage and sargassum seaweed in the OECS. The Caribbean Council. A report on behalf of The foreign and commonwealth office. pp 33-401.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México 2016–2020. 2016, 3–62. Disponible en línea: https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/e2fbcdaadd9665d726ee6bd2195eb913.pdf (acceso el 16 abril 2020).
- Gállego, A., Salcedo, D., López, G., Nirmalkar, K., Murugesan. S., García, J., Gutiérrez, M. and Tovar, L.(2019). Microbial profile of the leachate from Mexico city’s Bordo Poniente composting plant. An inoculum to digest organic waste. *Energies* 12(12), 2343. <http://doi.org/10.3390/en12122343>.
- Gerardi, M., (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. Wastewater microbiology series. United States of America: Ed. Wiley Interscience. p.53.
- Gower, J., Young, E. and King, S. (2013). Satellite images suggest a new sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4(8), 764–773.
- Gray, D. and Morrison, M. (2017). Anaerobic digestion economic feasibility study: Generating energy from waste, sewage and sargassum seaweed in the OECS. The Caribbean Council. A report on behalf of The foreign and commonwealth office. pp 33-401.
- Hanssen, J.F.; Indergaard, M.; Østgaard, K.; Bævre, O.A.; Pedersen, T.A. and Jensen, A. (1987). Anaerobic digestion of *Laminaria spp.* and *Ascophyllum Nodosum* and application of end products. *Biomass* 1987, 14, 1–13.
- Hengevoss, D., Hugli, C., Gross, T. y Mutz, D. (Ed.). (2017). Oportunidades para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. *Guía para los responsables de la toma de*

decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes. Suiza: GIZ. pp.31-38.

- Herazo, E. y Lizardi, M. (2019). Hidrocarburos: contaminación en el Caribe mexicano. *Revista Digital Universitaria* (20). DOI: <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a5>.
- Hernández, F. (2020). Obtención de biogás a partir de algas del tipo *Sargassum* de la playa Miramar de Cd. Madero Tamaulipas. [Tesis maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C-UUTT] pp.56-57.
- León, C. (2019). El sargazo a escena. *Salud Pública México*. 2019; 61:701-703. <https://doi.org/10.21149/10870>.
- Liotta, F., Panico, A., Esposito, G. an Frunzo, L. (2013). Biomethane potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The Open Environmental Engineering Journal* 5.
- López, L., Alvarado, J., Corral, J., Aguilera, A., Rodríguez, R., Guevara, S., Alcaraz, J., Rutiaga, J., Zárate, J., Ávalos, M., Morales, M,(2020). Prospective Study of the Exploitation of Pelagic *Sargassum* spp. as a Solid Biofuel Energy Source. *Appl. Sci.* 10, 8706.
- López, A., van der Geest, M., Deetman, B., van der Burg, S., Brust, H. & Truus, V. (2021). Opportunities for valorisation of pelagic *Sargassum* in the Dutch Caribbean. *Wageningen Food & Biobased Research*. ISBN 978-94-6395-751-9
- Louime, C., Fortune, J., and Gervais, G. (2017). *Sargassum* invasion of coastal environments: A growing concern. *American journal of environmental sciences*. 13 (1), 58-64.
- Marks, L. M., Reed, D. C., & Obaza, A. K. (2017). Assessment of control methods for the invasive seaweed *Sargassum horneri* in California, USA. *Management of Biological Invasions*, 8(2), 205-213.
- Márquez, G., Santibáñez, W., Trono, G., Montañó, M., Araki, H., Takeuchi, T., and Hasegawa, T. (2014). Seaweed biomass of the Philippines:

- Sustainable feedstock for biogas production. *Renewable and sustainable Energy Reviews* 38(2014)1056–1068.
- Martínez, G. (2019). Sargazo: la irrupción atípica de un ecosistema milenario. *Salud Pública Mex.* 2019; 61:698-700. <https://doi.org/10.21149/10838>.
- Massi, E. (2012). Anaerobic digestion. *Green Energy and Technology*, 47–63. doi:10.1007/978-1-4471-2369-9_3.
- Mclawrence, J. L. C., Sealy, H., & Roberts, D. (2017). The Impacts and Challenges of the 2015 Sargassum Seaweed Invasion in the Caribbean. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 43(4), 309-317.
- Milledge, J. J., & Harvey, P. J. (2016). Golden tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60.
- Milledge, J., Supattra, M., Lòpez, E. and Bartlett D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Coicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*. 13, 1523; doi:10.3390/en13061523. pp.1-27.
- Nájera, A., Gómez, J., García, C., Gutiérrez, R. y Rojas, M. (2010). Manejo de biogás y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México un panorama general. *LACANDONIA*, 4 (2).
- NOAA/AOML. Tracking Marine Debris - www.aoml.noaa.gov/keynotes/keynotes_0118_marinedebris.html (consultada en Agosto 2018).
- Núñez, L. (2017). Modelamiento y control de proceso de digestion anaerobia para la producción de biogas a partir de residues orgánicos y/o aguas residuales. [Tesis maestría. Universidad de Piura] pp.3-5.
- Oliveira, J., Alves, M. and Costa J. (2014). Optimization of biogas production from Sargassum sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology*. pp.480-485.

- Oyesiku, O. O., & Egunyomi, A. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgessen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 13(10).
- Park, J., Craggs, R. and Shilton, A., (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.* 2011,102, pp. 35-42.
- Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos en el estado de Quintana Roo 2009-2011. (2019). Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187443/Quintana_Roo.pdf
- Rajagopal, R. Massé, D. and Singh, G. (2013). A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresource Technology*. 143 (2013) 632-641.
- Ramos, J., (2014). Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus sp.* procedente de diferentes procesos. [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid] pp.5, 18.
- Raposo, F., De la Rubia, M., y Fernández-Cegrí, V. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode. An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (2011) 861-877.
- Rodríguez, R., Van Tussenbroek, B., y Jordán-Dahlgren, E. (Ed.). (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano (2014-2015). *Florecimientos algales nocivos en México* (pp.352-365). México, Quintana Roo: CICESE. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Rosa_Rodriguez-Martinez/publication/317222216_Afluencia_masiva_de_sargazo_pelagico_a_la_costa_del_Caribe_mexicano_2014-2015/links/592c5ec6458515e3d474aac4/Afluencia-masiva-de-sargazo-pelagico-a-la-costa-del-Caribe-mexicano-2014-2015.pdf

- Rodríguez, R.; Priyadararsi, D.; Torresccano, N.; Cabanilla, N.; Van Tussenbroek, B. (2020). Element concentrations in pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, DOI 10.7717/peerj.8667. pp. 1-19.
- Sadzawka, A, Carrasco, M., Grez, R. y De la Luz, M. (2005). Métodos de análisis de compost. Instituto de investigaciones agropecuarias-Centro regional de investigación. La platina, Santiago de Chile.
- Salazar, A. y Hernández, C. (2018). Evaluación de la eficiencia del sistema de gestión Integral de residuos sólidos urbanos en el municipio de Benito Juárez, Quintana Roo. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 20 (2), Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/401/40158030009/html/index.html>
- Salcedo, D. (2017). Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de México. [Tesis maestría. Instituto Politécnico Nacional] pp.42-44.
- Sánchez, A., Ortiz, M., Talavera, A. and Aguíñiga, S. (2012). Stable nitrogen isotopes in the turtle grass *Thalassia testudinum* from the Mexican Caribbean: Implications of anthropogenic development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 135 (2013) 86-93. N° DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.01.021>.
- Sánchez, D. (2015). Evaluación del potencial bioquímico de metanización de residuos orgánicos, usando como inóculo dos tipos de lixiviados provenientes de la planta de composta bordo poniente. [Tesis maestría. Instituto Politécnico Nacional].
- Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA)-Quintana Roo. (2019) <http://sargazo2018.semaqroo.gob.mx/> (21/10/19; 01:59 hr).
- Secretaria del Medio Ambiente (SEMARNAT). (2018). Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano;

<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-caribe-mexicano-154642>.

- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México, inciso “H”, puntos 85 y 86: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/lineamientos-tecnicos-y-de-gestion-para-la-atencion-de-la-contingencia-ocasionada-por-sargazo-en-el-caribe-mexicano-y-el-golfo-de-mexico>.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/nmx-120-playa-limpia-sustentable> (15/02/2020; 04:25 hrs).
- Sembera, J. A., Meier, E. J., & Waliczek, T. M. (2018). Composting as an Alternative Management Strategy for Sargassum Drifts on Coastlines. *HortTechnology*, 28(1), 80-84.
- Sitte, P., Weiler, E.W., Kadereit, J.W., Bresinsky, A., Körner, y Strasburguer, C. (2004). *Tratado de Botánica*. 35a edición. Barcelona: Edit Omega. pp. 668-669.
- Smetacek, V., Zingone, A., 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature* 504, 84–88.
- Tapia, R., Avila, J., Domínguez, J., Valero, D., Olguín, D., Pérez, D., and Alzate, L. (2018). Biological pretreatment of Mexican Caribbean macroalgae consortiums using Bm-2 strain (*Trametes hirsuta*) and its enzymatic broth to improve biomethane potential. *Energies*. 11(494), 2-11.

- TAPPI-Professional organization dedicated to the pulp and paper industries. (2006). Test method for acid-insoluble lignin in wood. T 222 om-02-02,2-14.
- Thompson, T., Young, B. & Baroutian, S. (2020a). Efficiency of hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of pelagic Sargassum for biogas and fertiliser recovery. *Fuel* 279(118527),1-12.
- Thompson, T., Young, B. & Baroutian, S. (2020b). Pelagic Sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118 (109564).1-12.
- Thompson, T., Young, B. & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere* 275 (130035).1-11.
- Trivedi, N., Gupta, V., Reddy, C. R. K., & Jha, B. (2015). Marine macroalgal biomass as a renewable source of bioethanol. Marine bioenergy: trends and developments. CRC Publisher, Taylor and Francis Group, USA, 197-216.
- Valencia, J. M. T., Demafelis, R. B., Borines, M. G., & Galdula, K. M. (2015). Bioethanol potential of brown macroalgae (Sargassum spp.). *Philippine Journal of Crop Science*, 40(2), 1-11.
- Van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., ... & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine pollution bulletin*, 122(1-2), 272-281.
- Vanegas, C. (2015) .Biogas production from seaweed biomass: A biorefinery approach. [Doctoral Tesis. Institute of Technology Sligo. Ireland].
- Vongvichiankul, C., Deebao, J.y Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and biogas

production in mesophilic screw anaerobic digester. *Energy procedia*. 138 (2017) 877-882.

Walsh, K. (2019). Examining the quality of a compost product derived from *Sargassum* (*Sargassum fluitans* and *Sargassum natans*) [Tesis de maestría, Universidad del Estado de Texas]. Repositorio Institucional: <https://digital.library.txstate.edu/bitstream/handle/10877/8143/WALSH-THESIS-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Witherington, B., Hiram, S., & Hardy, R. (2012). Young sea turtles of the pelagic Sargassum-dominated drift community: habitat use, population density, and threats. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 1-22.

IX.1 Normatividad consultada

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Artículos 4º y 115º fracción III, inciso c.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), 2018, Artículo 3º fracciones XXXII y XXXIII.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (LGPGIR), 2018, Artículos. 5º, fracción XXX; título segundo, artículos 7º fracción VII, 9ª fracción III y 10º.

Ley para la Prevención y la Gestión Integral de Residuos del Estado de Quintana Roo, 2015. Artículo 8º fracción XXXIX y XLI.

Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los Residuos del Estado de Quintana Roo, 2019. Artículos 8º fracción V, fracción VII; Sección IX artículos 75º y 76º.

NORMA Oficial Mexicana- NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural

Norma Ambiental para el Distrito Federal 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 Mexicana. NMX-AA-15-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de cuarteo, pero tiene un enfoque a los Residuos Orgánicos.

Norma Mexicana. NMX-AA-33-1985 Protección al ambiente contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de poder calorífico superior.

XI. Anexos

Anexo I. Memoria de cálculo para cantidades (g y ml) de sargazo, FORSU e inóculo para cada mezcla propuesta.

Los cálculos que deben realizarse preliminarmente para cargar los viales conforme al método de Angelidaki et al. (2009) tienen unas ligeras variaciones para la co-digestión, esto ya que son 2 los sustratos participantes. Independientemente de que siempre se respetó la relación 1:1 de los sustratos con el inóculo primero se trabajaron los datos para las relaciones entre estos fueron 2:1, 1:2 y 1:1. Para ello se emplearon de inicio las ecuaciones 1,2, y 3 respectivamente, para que los SV quedaran en la relación, tales cálculos se pudieron mejorar con lo aplicado por Reyes (2018).

Para la relación 2:1 se utilizó la ecuación (1):

$$SV_{2:1} = \frac{2}{3} \times SV_{S1} + \frac{1}{3} \times SV_{S2}$$

Para la relación 1:2 se utilizó la ecuación (2):

$$SV_{1:2} = \frac{1}{3} \times SV_{S1} + \frac{2}{3} \times SV_{S2}$$

Para la relación 1:1 se utilizó la ecuación (3):

$$SV_{1:1} = \frac{1}{2} \times SV_{S1} + \frac{1}{2} \times SV_{S2}$$

Posteriormente teniendo en cuenta las cantidades de SV para cada relación se procede a determinar las cantidades para cada sustrato en los viales para las respectivas mezclas. El volumen de operación fue de 60 ml y se consideró la cantidad de SV de sustratos e inóculo. Para el caso específico del sargazo recolectado sobre el mar sin pre-lavado con FORSU que contienen 528.27 g SV/Kg y el inóculo 8.64 g SV/L de inóculo. Para la relación sustratos inóculo (1:1) se dividen los SV de los sustratos entre los SV del inóculo (ecuación 4).

$$\frac{S}{I} = \frac{1x SV_S}{1x SV_I} = \frac{1 * 528.27 \frac{g SV}{kg S:FO}}{1 * 8.64 \frac{g SV}{L I}} = \frac{L}{kg} = 61.14 \frac{L}{Kg} = 61.14 \frac{ml}{g}$$

Esto indica que 61.14 ml del inóculo contienen lo mismo en SV que 1 g de sargazo con FORSU. Esta cantidad requiere corrección sumando 1 para el cálculo de masa de sustrato y asegurar que esta cantidad de SV de la muestra es correspondiente a SV del inóculo. Esto se observa en la ecuación 5:

$$\frac{S}{I}^c = \frac{S}{I} + 1 = 61.14 \frac{mL}{g} + 1 = 62.14 \frac{mL}{g}$$

Con este valor de la ecuación 5 se calcula la masa del sustrato con la ecuación 6:

$$W_s = \frac{Vol. Operación}{\frac{S}{I}^c} = \frac{60 mL}{62.14 \frac{mL}{g}} = 0.9655 g \approx 0.97 g$$

En este caso el peso que nos indica la ecuación 6 corresponde a ambos sustratos, por lo que se deberá recurrir a las ecuaciones 7 y 8 para la relación 2:1, 9 y 10 para la relación 1:2 o finalmente las 11 y 12 para la relación 1:1.

Cantidad de sargazo y FORSU relación SV 2:1, ecuaciones 7 y 8 (ejemplo de sargazo recolectado en el mar sin enjuague con FORSU relación 2:1):

$$Cantidad\ de\ sargazo\ (ec.\ 7): 2 * \frac{0.97\ g}{3} = 0.64\ g$$

$$Cantidad\ de\ FORSU\ (ec.\ 8): 1 * \frac{0.97\ g}{3} = 0.32\ g$$

Cantidad de sargazo y FORSU relación SV 1:2, ecuaciones 9 y 10:

$$Cantidad\ de\ sargazo\ (ec.\ 9): 1 * \frac{W_s\ (g)}{3} = X\ g$$

$$Cantidad\ de\ FORSU\ (ec.\ 10): 2 * \frac{W_s\ (g)}{3} = X\ g$$

Cantidad de sargazo y FORSU relación SV 1:2, ecuaciones 9 y 10:

$$Cantidad\ de\ sargazo\ (ec.\ 9): 1 * \frac{W_s\ (g)}{2} = X\ g$$

$$\text{Cantidad de FORSU (ec. 10): } 1 * \frac{Ws (g)}{2} = Xg$$

El valor total calculado de Ws (de la ecuación 6) se procede a emplear para determinar el volumen del inóculo con la ecuación 11. Cabe destacar que la densidad del inóculo es de 1.09, por lo que se considera como la del agua y la obtención de los ml a combinado con g de sustratos se hace directa:

$$V_i = \frac{S}{I} * Ws = 61.14 \frac{ml}{g} * 0.97 g = 59.3058 \approx 59.03 mL$$

Con finalidad de corroborar que sustratos e inóculo son equivalentes al volumen de operación se suman (ecuación 12):

$$Vol. Operación = Ws + V_i = 0.97 + 59.03 = 60$$

Anexo II. Ecuaciones empleadas para la estandarización de resultados del PBM.

Debido a que el método de Angelidaki et al. (2009) es un método estandarizado, los resultados que se obtengan tendrán que reportarse en condiciones estándar de presión y temperatura (STP) para que en un momento dado, al comparar este rendimiento con autores de distintos puntos geográficos se pueda tener certeza. Ya que se obtuvo la composición de biogás y el volumen generado para cada mezcla propuesta y controles se corrigen los valores de gas metano en condiciones estándar (55° C para la temperatura de operación trabajada) y la presión en la Ciudad de México (0.77 atm) mediante la siguiente ecuación 13:

$$VR_{(55)} = V_{dc} \times V_i$$

Dónde:

$VR_{(55)}$ = Volúmen real del biogás generado a una temperatura de 55°C (mL)

V_{dc} = Volúmen registrado en el desplazamiento de columna (mL)

V_i = Volúmen de biogás registrado en la inyección al equipo de CG respecto a la curva de calibración del método (mL). Este valor va de 0 a 1

Una vez procesado el dato del volumen real de biogás obtenido se procede a la conversión del volumen real de metano obtenido con la ecuación 14:

$$VR_{55 (CH_4)} = VR_{55} * \frac{C_{CH_4}}{100}$$

Dónde:

$VR_{55 (CH_4)}$

= *Volúmen real de metano (CH₄) generado a la temperatura de operación de 55°C (mL)*

C_{CH_4}

= *Concentración del metano en el biogás (%), es el dato que arroja el cromatograma.*

Para conocer los moles de metano se procede a despejar de la ecuación de gases ideales a n (ecuación 15):

$$P * VR_{(55)} = n_{CH_4} * R * T \rightarrow n_{CH_4} = \frac{P * VR_{(55)}}{R * T}$$

Dónde:

P = *Presión CDMX (atm)*

$VR_{(55)}$ = *Volúmen de metano generado (mL)*

n_{CH_4} = *Nº de moles de CH₄ (moles)*

R = *Constante universal de los gases ideales (0.082 $\frac{atm * mL}{mol * K}$)*

T = *Temperatura (55°C + 273), (K)*

Finalmente se aplicará la ecuación 16, el despeje del volumen, que corresponde al volumen de CH₄ en condiciones estándar de presión y temperatura en la Ciudad de México:

$$V_{CH_4 STP} = \frac{n_{CH_4} * R * T}{P}$$