



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

“ESTUDIO EN LA DUDA, ACCION EN LA FE”



**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIGESTIÓN Y
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA LECHUGA DE AGUA (PISTIA
STRATIOTES).**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

DANIEL LÓPEZ BURELO

DIRECTOR:

M.C. ISRAEL ÁVILA LÁZARO

CO-DIRECTOR

DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA

VILLAHERMOSA, TABASCO.

NOVIEMBRE, 2019.

Producción De Biogás A Partir De Digestión Y Codigestión Anaerobia De La Lechuga De Agua (Pistia Stratiotes)

Por Daniel López Burelo

CANTIDAD DE PALABRAS 22419

HORA DE ENTREGA

30-JUN-2025 09:55A. M.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO

116994265

Producción De Biogás A Partir De Digestión Y Codigestión Anaerobia De La Lechuga De Agua (Pistia Stratiotes)

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.yumpu.com Internet	1024 palabras — 5%
2	hdl.handle.net Internet	248 palabras — 1%
3	1library.co Internet	243 palabras — 1%
4	repositorio.uap.edu.pe Internet	215 palabras — 1%
5	repositorio.ecci.edu.co Internet	213 palabras — 1%
6	updocs.net Internet	197 palabras — 1%
7	www.sifupro.org.mx Internet	187 palabras — 1%
8	repositorio.unap.edu.pe Internet	159 palabras — 1%
9	repositorio.usfq.edu.ec Internet	154 palabras — 1%

10	pure.udem.edu.mx Internet	136 palabras — 1 %
11	tesis.ipn.mx Internet	89 palabras — < 1 %
12	repositorio.unan.edu.ni Internet	62 palabras — < 1 %
13	vdocuments.site Internet	55 palabras — < 1 %
14	repositorioinstitucional.uson.mx Internet	53 palabras — < 1 %
15	literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080 Internet	52 palabras — < 1 %
16	docplayer.es Internet	49 palabras — < 1 %
17	itzamna.bnct.ipn.mx Internet	49 palabras — < 1 %
18	idus.us.es Internet	45 palabras — < 1 %
19	www.idcsevilla.org Internet	44 palabras — < 1 %
20	documentos.uru.edu Internet	39 palabras — < 1 %
21	energia.azc.uam.mx Internet	38 palabras — < 1 %

repositorio.uptc.edu.co

22	Internet	38 palabras — < 1%
23	dcb.uas.edu.mx Internet	36 palabras — < 1%
24	ciencialatina.org Internet	35 palabras — < 1%
25	zagan.unizar.es Internet	35 palabras — < 1%
26	core.ac.uk Internet	33 palabras — < 1%
27	www.zaragoza.unam.mx Internet	33 palabras — < 1%
28	www.amica.com.mx Internet	31 palabras — < 1%
29	bdigital.zamorano.edu Internet	28 palabras — < 1%
30	idoc.pub Internet	28 palabras — < 1%
31	pdffox.com Internet	28 palabras — < 1%
32	ipicyt.repositorioinstitucional.mx Internet	27 palabras — < 1%
33	colposdigital.colpos.mx:8080 Internet	26 palabras — < 1%
34	www.scribd.com	

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 23 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

OCTUBRE 29 DE 2019

**C. DANIEL LÓPEZ BURELO
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se les autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA LECHUGA DE AGUA (PISTIA STRATIOTES)"**, asesorado por el M. en C. Israel Ávila Lázaro y Dr. José Ramón Laines Canepa sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Raúl German Bautista Margulis, Ing. Leonardo Arias Chable, M. en C. Israel Ávila Lázaro y MIPA. Luis Fernando Broca Martínez.

**A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCION EN LA FE**


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.

CARTA AUTORIZACIÓN

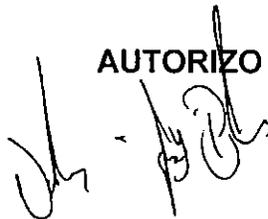
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA LECHUGA DE AGUA (PISTIA STRATIOTES)”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

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

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 29 de Octubre de 2019.

AUTORIZO



DANIEL LÓPEZ BURELO



DEDICATORIA

Por nada estéis afanosos, sino sean conocidas vuestras peticiones delante de Dios en toda oración y ruego, con acción de gracias. Y la paz de Dios, que sobrepasa todo entendimiento, guardará vuestros corazones y vuestros pensamientos en Cristo Jesús.

Filipenses 4:6-7

A Jesucristo

Por ser mi Dios, mi ayudador aquel que sin él no hubiera sido posible nada aun mi existencia. Gracias por permitirme concluir este proyecto, por darme él conocimiento y sabiduría porque sé que todo proviene de ti. Gracias por que aun sin merecerlo tú me cumples este sueño en realidad, por ponerme a las personas correctas en los momentos precisos en mi vida, por estar conmigo en cada momento, en mis alegrías y tristezas. A ti te doy la gloria la honra porque solo tú te la mereces Dios. Gracias por que me has dado a los mejores padres del mundo que siempre han estado ahí para mí. ¡Gracias por mi Hermosa Familia <3 los amo!!! Tengo increíbles compañeros de vida, los mejores hermanos, cuñados y mi hermoso sobrino & por su puesto mi amada Novia. Gracias porque creíste en mí, en que podría lograrlo, porque supliste mis necesidades a través de mis padres. Soy y seré siempre tu hijo y te pondré siempre en alto a donde quiera que tú me envíes, “soy tu siervo Jesucristo”.

A mis padres

Carmen López Alejandro & Irma Burelo Broca

Les agradezco de todo corazón la dicha que me permiten de ser su Hijo, los amo son todo para mí. Gracias por que sin ustedes no hubiera podido haber logrado nada. Gracias por aconsejarme, por exhortarme y achearme siempre, he aprendido demasiado de sus enseñanzas. Admiro su fortaleza, humildad y su amor por servir a DIOS NUESTRO CREADOR. Tengo la esperanza que tendrán su recompensa haya en los cielos. Pero mientras Dios me los tenga en salud y en bendición, aquí me toca a mí. No culmino una meta más sino culminamos juntos por que empezamos juntos.

¡Por ustedes lo eh logrado!



AGRADECIMIENTOS

- ❖ *A Jesús mi Señor y Salvador por guiarme siempre y darme la sabiduría, paciencia y sobre todo la dedicación y mi amor a la profesión porque sé que este es un regalo que él me ha dado.*
- ❖ *Gracias a la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por haberme permitido formarme en ella, gracias a todas las personas que trabajan en aquí: Maestros, profesores investigadores, administrativos, intendentes, de mantenimiento, vigilantes etc. Por qué me acompañaron sea de manera directa o indirecta, a lo largo de mi carrera profesional y sé que todos me aportaron un poquito de todo lo que ahora reflejado en la culminación de mis estudios universitarios.*
- ❖ *A mi Director, amigo y hermano M. C. Israel Ávila Lázaro, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto, por la confianza y dedicación en su tiempo compartido para mí. Gracias por trasmitirme grandes conocimientos que me ayudaron a encontrar el éxito.*
- ❖ *A mi Co-Director al Dr. José Ramón Laínez Canepa. por todo su apoyo incondicional y conocimientos compartidos a lo largo de este proyecto.*
- ❖ *A mi casi Co-directo externo. El M. C. Víctor Manuel Villegas Cornelio. Profesor de la Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH). Quiero agradecer amado amigo y hermano por tu gran apoyo. Por qué fuiste una pieza clave en el desarrollo de este proyecto, porque compartimos horas de trabajo en el laboratorio, salidas de campo y desvelos aun en vacaciones. Gracias por tu gran calidad humana, eso es muy valioso ti. Gracias por tu apoyo mutuo y por tus grandes conocimientos que me brindas hasta el día de hoy.*



- ❖ *Al Dr. Raúl German Bautista Marguilis por su apoyo y amistad incondicional. Porque sin su ayuda algunos estudios de mi investigación no hubieran sido posibles. Gracias por sus valiosos conocimientos. ¡Muchas Gracias!*
- ❖ *Al Dr. José Antonio Azamar Barrios responsable del Laboratorio de Física Aplicada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Campus Mérida, Yucatán. Por facilitarme los equipos necesarios para llevar a cabo esta investigación, sus conocimientos y apoyo incondicional. Le agradezco de todo corazón su tiempo prestado y su gran amabilidad. Gracias por ser más que un mentor un amigo. ¡Muchas Gracias!*
- ❖ *Al Dr. Rudy Solís Silván por todo tu apoyo incondicional, gracias Doctor, amigo y hermano por que fuiste una pieza clave para este proyecto. Gracias por tu tiempo prestado, por las horas de desvelos y por tus aportes importantes en el conocimiento. ¡Muchas Gracias!*
- ❖ *A mis sinodales Dr. Raúl German Bautista Marguilis, Ing. Leonardo Arias Chable, M.C. Israel Ávila Lázaro, al M.C. José Aurelio Sosa Oliver y al MIPA. Luis Fernando Broca. Gracias por brindarme su valioso tiempo en la revisión de esta Tesis, por sus dudas aclaradas, por el interés, la motivación, apoyo y critica necesarios para la realización de este trabajo.*
- ❖ *¡Le doy las gracias a mis compañeros y Colaboradores la planta piloto de Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos N°3 y al gran equipo de colaboradores del Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) quienes siempre estuvieron a la disposición del trabajo, gracias por el apoyo!! Gracias por su dedicación en sus tareas diarias, por tener siempre ese espíritu de unidad en equipo, por su responsabilidad y ante todo compañerismo.*



- ❖ *A mis amados padres Carmen López Alejandro y a Irma Burelo Broca, porque fueron la motivación principal para esforzarme y concluir todo lo que me he propuesto. Gracias por que sinceramente no encuentro palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí. Sé que Dios me ha regalado los mejores padres que jamás habría podido tener. LOS AMO.*

- ❖ *Y por último y no menos importantes a mi amada novia la Lic. en Enfermería Liliana Giselle Turrent Gamas, mi compañera de viaje en esta vida, pongo estas palabras para ti porque has sido desde que te conozco punta de lanza e hincapié en mi superación personal, gracias por tu apoyo mi amor te amo, siempre me has animado e incitado a dar lo mejor de mí. Junto hasta la eternidad :3.*

- ❖ *Y de igual forma a todos los que con sus consejos y ánimos estuvieron conmigo se los agradezco de todo corazón.*

“Un poco de conocimiento que actúa, es mucho más valioso que tener conocimiento y no actuar”.

- Kahlil Gibran



CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	JUSTIFICACIÓN	3
III.	ANTECEDENTES	4
IV.	MARCO TEÓRICO	6
IV.1	Digestión anaerobia (DA)	6
4.1.1.	Co-digestión anaerobia	6
4.1.2.	Etapas de la DA	7
4.1.3.	Hidrólisis	7
4.1.4.	Etapa fermentativa o acidogénica	7
4.1.5.	Etapa acetogénica	7
4.1.6.	Etapa metanogénica	8
4.1.7.	Producción de metano	9
IV.2	Sustratos	10
IV.3	Parámetros evaluados durante el proceso de DA	11
4.3.1.	Sólidos totales	11
4.3.2.	Sólidos volátiles	12
4.3.3.	Agitación	12
4.3.4.	Potencial de hidrógeno (pH)	13
4.3.5.	Temperatura	14
4.3.6.	Tiempo de retención hidráulica (TRH)	15
4.3.7.	Potencial óxido-reducción (Redox)	15
4.3.8.	Demanda química de oxígeno (DQO)	15
4.3.9.	Determinación de nitrógeno total	16
4.3.10.	Condiciones para la digestión anaerobia	16
IV.4	Productos de la digestión anaerobia	17
4.4.1.	El metano y el biogás	17
4.4.2.	Dióxido de carbono (CO ₂)	18
4.4.3.	Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	18
4.4.4.	Purificación del biogás	19
IV.5	Aprovechamiento del biogás	19
IV.6	Nutrientes	19
IV.7	Digestatos y mejoradores de suelos	20
IV.8	Bio-abono en forma líquida o biol	21
IV.9	Bio-abono en forma sólida	21
V.	OBJETIVOS	23
V.1	Objetivo General	23



V.2	Objetivos particulares.....	23
VI.	HIPÓTESIS.....	23
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
VII.1	Colecta y procesamiento de los sustratos.....	24
VII.2	Análisis elemental.....	24
VII.3	Obtención de la fórmula química.....	25
VII.4	Determinación de la masa de los gases.....	25
VII.5	Cálculo del volumen de los gases.....	26
VII.6	Cálculo de producción de biogás para las co-digestiones.....	26
VII.7	Evaluación de los parámetros del proceso de digestión y codigestión anaerobia.....	27
VII.8	Diseño experimental.....	27
VII.9	Montaje de reactores y monitoreo del proceso de digestión anaeróbica.....	27
VII.10	Determinación de los parámetros fisicoquímicos.....	28
7.10.1.	Determinación del pH, conductividad eléctrica y ORP.....	28
7.10.2.	Determinación de SV, ST y Ceniza.....	29
7.10.3.	Determinación MO.....	30
7.10.4.	Determinación COT.....	30
7.10.5.	Determinación de DQO.....	30
7.10.6.	Determinación de NT.....	31
7.10.7.	Determinación de Fósforo (P).....	31
7.10.8.	Determinación de Potasio (K).....	32
VII.11	Determinación de la composición porcentual real de biogás.....	33
VII.12	Análisis estadístico.....	35
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
VIII.1	Área de estudio.....	36
VIII.2	Análisis elemental.....	36
VIII.3	Monitoreo del proceso.....	39
8.3.1.	pH.....	39
8.3.2.	Conductividad eléctrica (CE).....	40
8.3.3.	Potencial oxidación-reducción (ORP).....	41
8.3.4.	Sólidos totales (ST).....	42
8.3.5.	Sólidos volátiles (SV).....	43
8.3.6.	Cenizas.....	44
8.3.7.	Carbono orgánico total.....	45



8.3.8. Demanda química de oxígeno (DQO)	46
8.3.9. Nutrientes N, P y K al final del proceso	48
8.3.10. Nitrogeno (%)	48
8.3.11. Fosforo (%).....	49
8.3.12. Potasio (%).....	50
8.3.13. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	52
8.3.14. Optima Biogás	53
8.3.15. Analizador de gas de combustión Optima Biogás 7	54
8.3.16. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier para Nutrientes (FTIR).....	55
8.3.17. Análisis Estadístico	56
8.3.17.1. Sólidos totales	56
8.3.17.2. Sólidos volátiles totales.....	57
8.3.17.3. Cenizas.....	58
8.3.17.4. DQO.....	59
8.3.17.5. pH.....	60
8.3.17.6. CE.....	61
8.3.17.7. Temperatura	62
8.3.17.8. COT	62
8.3.17.9. Nitrógeno.....	63
8.3.17.10. Potasio.....	64
8.3.17.11. Fosforo.....	65
IX. CONCLUSIONES	66
X. LITERATURA CITADA.....	67
XI. ANEXO	75
XII. ABREVIATURAS UTILIZADAS.....	78

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Especies que participan en las fases de degradación.....	9
Tabla 2. Bacterias que participan en la fermentación durante las cuatro fases.....	10
Tabla 3. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.....	12
Tabla 4. Características generales del biogás.....	17
Tabla 5. Composición físico química de biol porcino.....	21



Tabla 6.	Comparaciones en función de valores promedios de algunos de los análisis químicos.....	22
Tabla 7.	Composición de los tratamientos.....	27
Tabla 8.	Frecuencia de grupo para gases.....	34
Tabla 9.	Contenido elemental de pistia stratiotes por equipo Perkin Elmer Modelo pe2400.....	37
Tabla 10.	Contenido Elemental recalculado de la Lechuga de Agua.....	37
Tabla 11.	Formula química de la lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i>).....	38
Tabla 12.	Ecuación balanceada de la lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i>).....	38
Tabla 13.	Estimación teórica de Biogás de la lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i>).....	38
Tabla 14.	Valores de ph promedio por tratamiento obtenido durante el Monitoreo.....	39
Tabla 15.	Valores de ce (dS/cm ²) promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	48
Tabla 16.	Valores de orp promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	41
Tabla 17.	Valores de ST promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	42
Tabla 18.	Valores de SV promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	43
Tabla 19.	Valores de cenizas promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	45
Tabla 20.	Valores de COT promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	46
Tabla 21.	Valores de DQO promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	47
Tabla 22.	Valores de nitrógeno promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	48
Tabla 23.	Valores de fosforo promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	49
Tabla 24.	Valores de potasio promedio por tratamiento durante el monitoreo.....	51
Tabla 25.	Porcentaje de gases por tratamientos con el equipo Optima Biogas 7.....	53
Tabla 26.	Valores de banda de adsorción IR.....	75
Tabla 27.	Especificaciones Fisicoquímicas del Humus de Lombriz.....	76

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de los procesos de la DA.....	8
Figura 2.	IR de Grupos Funcionales.....	34
Figura 3.	Fotografía aérea de la laguna artificial de agua dulce con <i>Pistia stratiotes</i>	36



Figura 4. Fotografía de los viales con lechuga de agua seca para análisis elemental.....	36
Figura 5. Grafico del comportamiento del pH de los tratamientos.....	39
Figura 6. Grafico del comportamiento del CE de los tratamientos.....	40
Figura 7. Grafico del comportamiento del ORP de los tratamientos.....	41
Figura 8. Grafico del comportamiento del ST% de los tratamientos.....	42
Figura 9. Grafico del comportamiento del SV% de los tratamientos.....	44
Figura 10. Grafico del comportamiento de Cenizas % de los tratamientos	45
Figura 11. Grafico del comportamiento del COT de los tratamientos	46
Figura 12. Grafico del comportamiento del DQO de los tratamientos	47
Figura 13. Grafico del comportamiento del Nitrógeno de los tratamientos	48
Figura 14. Grafico del comportamiento del Fosforo de los tratamientos	50
Figura 15. Grafico del comportamiento del Potasio de los tratamientos.....	51
Figura 16. Gráfico de la absorbancia del Biogás por tratamiento en FTIR	53
Figura 17. Grafica del comportamiento de los Gases por tratamiento.....	54
Figura 18. Analizador de gas de Combustión OPTIMA BIOGAS 7	55
Figura 19. Gráfico de la absorbancia de Nutrientes por tratamiento en FTIR	56
Figura 20. Grafico del Análisis de Varianza de Solidos Volátiles.....	57
Figura 21. Grafico del Análisis de Varianza de Cenizas.....	58
Figura 22. Grafico del Análisis de Varianza de DQO.....	59
Figura 23. Grafico del Análisis de Varianza de pH	60
Figura 24. Grafico del Análisis de Varianza de CE.....	61
Figura 25. Grafico del Análisis de Varianza de COT	62
Figura 26. Grafico del Análisis de Varianza de Nitrógeno	63
Figura 27. Grafico del Análisis de Varianza de Potasio	64
Figura 28. Grafico del Análisis de Varianza de Fosforo.....	65
Figura 29. Recolecta de Sustrato (<i>Pistia Stratiotes</i>).	76
Figura 30. Equipos de medición de parámetros pH y CE.....	76
Figura 31. Agitación de los reactores.	76
Figura 32. Bitácora de trabajo para anotaciones me peso de ST, SV Y % Cenizas	77
Figura 33. Digestión de la Muestra para Nitrógeno Total.	77
Figura 34. Medición de CE.....	77
Figura 35. Toma de muestra para FTIR	77
Figura 36. Equipo analizador de partículas por FTIR..	77
Figura 37. Acondicionamiento del tratamiento de la muestra para leerse por FTIR	77
Figura 38. Interpretación de los Espectros de FTIR..	77



CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Análisis elemental	26
Ecuación 2. Análisis elemental	26
Ecuación 3. Masa del gas	26
Ecuación 4. Volumen del gas	26
Ecuación 5. Biogás para las codigestiones.....	27
Ecuación 6. Materia Orgánica (MO).....	30
Ecuación 7. Carbono Orgánico Total (COT)	30
Ecuación 8. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	31



I. INTRODUCCIÓN

La digestión (DA) y codigestión anaerobia son las tecnologías más utilizadas en el sector agrícola, ya que permite la reducción de gases de efecto invernadero a través de la captura y el uso de biogás como una fuente de energía renovable (Moreno *et al.*, 2014). El biogás es un combustible gaseoso renovable, que se genera por digestión anaerobia (DA) de residuos orgánicos (Pantawong R., Chuanchai A., Thipbunrat P., Unpaprom Y., 2015). Los sustratos utilizados para la DA y codigestión, normalmente son considerados como residuos (residuos de comida, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, lodo de aguas residuales e industrias agrícolas, etc.), los cuales causan problemas ambientales cuando interactúan con las diferentes esferas ambientales (geosfera, hidrosfera, Biosfera) (Rameshprabu, Kawaree, & Unpaprom, 2015).

Algunos materiales orgánicos, a pesar de que no provienen de alguna actividad de producción, presentan problemas y que por su abundancia afectan otros recursos importantes para el ser humano, como ejemplo, se tiene a las plantas acuáticas (microfitas flotantes) invasoras que cubren diversos sistemas acuáticos trayendo una serie de problemas al mismo. Las plantas flotantes invasoras suelen ser considerada un problema en los sistemas acuáticos. La limpieza de estos sistemas para eliminar esta plaga vegetal que genera una gran cantidad de material orgánico al que no se le da tratamiento, se convierte en un residuo orgánico de consecuencias negativas para el entorno.

En la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se cuenta con un cuerpo de agua artificial compuesto de cuatro lagunas donde albergan diferentes especies. Dichas lagunas se ven afectadas por procesos de eutrofización, limitación de luz, y suministro de oxígeno debido al exceso de vegetación macrófita que abundan en ella. Los problemas más visibles son causados por la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) debido a que cubre todo el espejo de agua de las lagunas. Además, que causa mal paisajismo y no se logran percibir las especies que abundan en dichas lagunas.

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)

Daniel López Burelo



Barbosa y Araúz (2013), reportan *Pistia stratiotes* como planta invasora en México. Sin embargo, la lechuga de agua puede ser aprovechada para la producción de biogás a partir de DA y codigestión con otros sustratos orgánicos tales como: Contenido gastroruminal vacuno (rumen) y sangre bovina para obtener un producto con valor agregado. Estos dos últimos sustratos son residuos generados en la industria ganadera y representan una problemática ambiental a nivel mundial.

Ante tal situación, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de la lechuga de agua (*P. Stratiotes*) para la producción de biogás y en combinación con rumen y sangre bovina, a escala de laboratorio. Esto permitirá proponer un plan de manejo adecuado de este espécimen y para su aprovechamiento, beneficiando al sector agrícola y pesquero, así como zonas recreativas y de conservación afectados por esta problemática ambiental.



II. JUSTIFICACIÓN

El proceso de DA y codigestión para la producción de biogás, es una alternativa viable de manejo y disposición final de los residuos orgánicos de la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*). Esto permite que tales residuos no tengan un efecto significativo sobre el medio ambiente. La recolección de la lechuga de agua de los cuerpos lagunares del campus universitario contribuye a la no eutrofización, malos olores y excesos de sedimentos. Además, se mantienen los espejos de agua limpios, con buena penetración de luz y oxigenación. Todo esto conlleva a que la Unidad de Manejo Ambiental (UMA) tengan un mejor control en el manejo de ellas. Asimismo, permiten un mejor paisajismo hacia la percepción de las personas que visitan y operan la UMA. Aunado a eso no solo es la recolección de la lechuga de agua, si no también disposición final de tratamiento mediante DA y codigestión para la producción de biogás.

El biogás es catalogado como una fuente de energía renovable, ya que se puede utilizar para la generación de energía eléctrica a través de la combustión del Metano (CH_4) o como fuente calorífica libre de CO_2 . Esto contribuye a minimizar los gases de efecto invernadero. Teniendo en cuenta que la lechuga de agua es una planta de rápida proliferación y considerada como especie invasora, tiene mucho potencial como materia prima para la producción de biogás.



III. ANTECEDENTES

La DA de diferentes tipos de biomasa con alto contenido lignocelulósico tal como hierbas, semillas y residuos de semillas y macrofitas flotantes como *Eichhornia crassipes*, *Cabomba caroliniana*, y *Salvinia molesta* han sido evaluadas. Sin embargo existen pocos reportes de digestión anaerobia de *Pistia stratiotes* (O'Sullivan, Rounsefell, Grinham, Clarke, & Udy, 2010).

Hernández *et al.* (2015), consideran que la lechuga de agua (*P. stratiotes*) tiene un gran potencial para la producción de biogás a través de procesos de DA y codigestión utilizando fluido ruminal como inóculo. Estos autores documentaron que la producción de metano puede incrementarse hasta en un 4.3%, cuando la lechuga de agua es procesada con DA e inoculada con líquido ruminal vacuno, durante la digestión encontraron que el pH no tiene efecto en el proceso, ya que permanece aproximadamente en un valor neutro.

Pantawong *et al.* (2015), estudiaron la viabilidad en la producción de biogás a partir de lechuga de agua (*P. stratiotes*) con digestión anaerobia e inóculo anaerobio mesofílico. La lechuga de agua fue deshidratada y pulverizada antes de la fermentación. Los experimentos se llevaron a cabo en reactores a escala laboratorio con la adición de inóculos durante 45 días. Como resultados encontraron que la lechuga de agua fue capaz de generar 9667.33 mL de biogás, del cual el 66.35% correspondió a metano. Con base en estos resultados, la lechuga de agua se presenta como un sustrato con potencial para la producción de biogás mediante DA y codigestión.

Abbasi y Nipaney (1991), indican que la lechuga de agua es usada como sustrato para la producción de biogás mediante procesos de DA y codigestión utilizando inóculo y estiércol vaca en reactores. El uso de este sustrato con inoculación y sin ella, mostró que el contenido de metano del biogás en las muestras inoculadas estuvo en el rango de 52-54% durante los primeros 2 días de la digestión y permaneció en el rango de 61-68% para un período 30 días. En el caso del biogás



de las muestras no inoculadas consistió únicamente en dióxido de carbono. Por su parte Kumar *et al.* (2017), reportaron un estudio donde utilizaron biomasa seca de lechuga de agua para la producción de biogás mediante DA, después de su uso como plantas remediadoras de aguas residuales de efluentes de ingenios azucareros. La muestra seca y molida de lechuga de agua fue inoculada con estiércol de vaca digerido (10% p/v). El potencial de producción de biogás obtenido por estos autores fue de 8478.6 mL en 30 días de digestión.

Abbasi *et al.* (1991), reportaron con base a experimento la viabilidad de la lechuga de agua como sustrato para la producción de biogás mediante procesos de DA. Los experimentos se llevaron a cabo a escala de laboratorio con la adición de inóculo a base de estiércol de ganado digerido, mantenidos bajo condiciones de temperatura estable. Los rendimientos de biogás estuvieron en el rango de 533-707 l/kg de sólidos volátiles, obtenidos en un lapso de tiempo de 30 días de digestión. El contenido promedio de metano fue del 58-68%. Debido a su alta biodegradabilidad (aproximadamente 83-99% de sólidos volátiles), la lechuga de agua tiene potencial como sustrato para la producción de biogás.

Dębowski *et al.* (2013), estudiaron la posibilidad de aplicar biomasa de algas para fines de producción de biogás y determinar la efectividad del proceso de fermentación de algas pertenecientes a diversos grupos taxonómicos, provenientes de diversas biocenosis y caracterizadas por diferentes morfologías y propiedades. Este trabajo concluye con información sobre métodos y soluciones tecnológicas para la producción de biomasa de algas, así como sobre los impedimentos y oportunidades derivados del uso de biomasa de algas en las tecnologías de producción de biogás.

Chanda *et al.* (1991), evaluaron la composición química de malezas acuáticas incluida la lechuga de agua. Para esta planta los componentes químicos como la lignina, celulosa, pentosano, lípidos, pectina son compuestos de fácil degradación en cualquier proceso de transformación.



IV. MARCO TEÓRICO

IV.1 Digestión anaerobia

La DA es una de las tecnologías más utilizadas en el sector agrícola, permite la reducción de gases de efecto invernadero a través de la captura y el uso de biogás como una fuente de energía renovable. Además, permite obtener una mejor calidad del agua y aire, controla los olores y mejora el control de nutrientes (Moreno, *et al.* 2014). La DA es la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno dando como resultado biogás compuesto con cantidades altas de metano y el lodo estabilizado, conocido como digerido. Se utilizan digestores para llevar a cabo la fermentación anaeróbica, de igual forma se controlan los parámetros adquiridos en el sistema. Este proceso se encuentra de forma natural y espontáneo en diferentes ámbitos, por ejemplo, en pantanos, en yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales (AGROWASTE, 2013).

Los gases producidos tienen un valor calórico de alrededor de 20 – 25 MJ/m³ y una composición que varía de acuerdo al sustrato que se alimenta, donde el porcentaje de metano y sulfuro de hidrógeno oscila entre el 40 y el 70 % para el primero y hasta el 3 % para el segundo (Chen *et al.*, 2016).

4.1.1. Co-digestión anaerobia

La co-digestión consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con el objetivo de aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces (Kim 2015; IDAE, 2007); Compartir instalaciones de tratamiento; Unificar metodologías de gestión; Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado y reducir costes de inversión y explotación. El término co-digestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado.



La co-digestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico. Los factores importantes que coadyuvan a mejorar los procesos de digestión y/o co-digestión anaerobia son la temperatura, agitación y pH, (Sosa y Laines, 2012). Se han conseguido buenos resultados para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos de la industria de carne y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de biogás y metano, del orden de 47 m³/t de residuo introducido (Zhang, 2012; Ageyman. y Tao, 2014). También se han conseguido buenos resultados con la co-digestión de lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, la mezcla de estos últimos con aguas residuales urbanas, y la co-digestión de fangos de depuradora y residuos de frutas y verduras (Rao y Baral, 2011). residuos urbanos e industriales acostumbran a contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, por lo cual presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos (IDAE, 2007).

4.1.2. Etapas de la DA

4.1.3. Hidrólisis

Consiste en la transformación controlada por enzimas extracelulares en la que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de energía y energía para células de microorganismo. Por lo tanto, es la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros por acción de microorganismos hidrolíticos aerobios facultativos.

4.1.4. Etapa Fermentativa o Acidogénica

Es una etapa controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos orgánicos solubles formados en la hidrolisis son convertidos en otro compuesto de peso molecular intermedio; dióxido de carbono, hidrogeno, ácidos orgánicos como el ácido acético, propiónico y butírico fundamentalmente, alcoholes



alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico mediante microorganismos fermentativos o por oxidantes anaerobios.

4.1.5. Etapa Acetogénica

Etapa microbiológica en donde los ácidos y alcoholes son convertidos en ácido acético, hidrogeno y CO₂ por microorganismos acetogénicos.

4.1.6. Etapa Metanogénica

Es la última reacción química consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y ácido fórmico en CO₂, posteriormente la formación de metano a partir de CO₂ e hidrogeno (AGROWASTE, 2013; Varnero Moreno, 2015).

Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos los que degradan el ácido acético a metano (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrogeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas) (Figura 1).

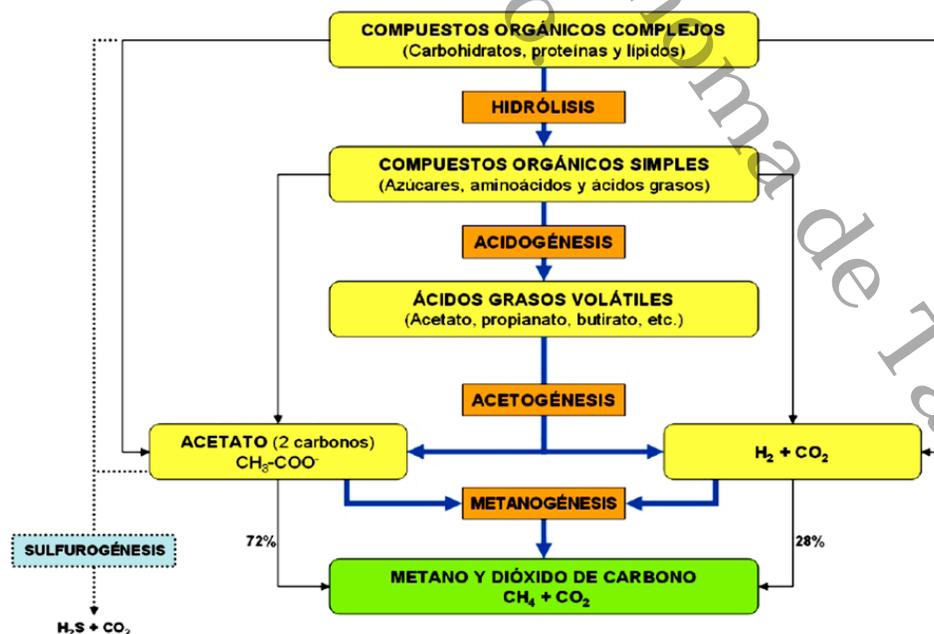


Figura 1. Diagrama de los procesos de la DA (Adaptado de Pavlostathis *et al.*, 1991).



4.1.7. Producción de metano

La principal producción de metano es la correspondiente de la transformación de ácido acético, considerándose que alrededor del 70 % del metano producido se forma a partir de acetato. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica (Tabla 1).

Tabla 1. Especies que participan en las fases de degradación.

1° Y 2° FASE	3° Y 4° FASE
Participan bacterias de al menos 128 órdenes de 58 especies y 18 géneros. Las especies: Clostridium, Ruminococcus, Eubacterium y Bacteroide.	Bacterias metanogénicas

Las especies Acetobacter y Eubakterium tienen una participación similar en cada proceso.

En la actualidad, se han identificado 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes, existen diversos microorganismos que pertenecen al sistema ecológico de un biorreactor y que participan indirectamente en la degradación. Por ejemplo, Staphylococcus, especie que se desarrolla con frecuencia en los digestores, puede provocar riesgos para la salud del personal que opera el digestor si no se toman las medidas sanitarias necesarias (Varnero, 2011). En la Tabla 2, se observa las especies Acetobacter y Eubakterium que participan en el proceso de la digestión anaerobia.



Tabla 2. Bacterias que participan en la fermentación durante las cuatro fases.

TAXONOMÍA	ESPECIES	DESCRIPCIÓN	METABOLISMO
Género: Acetobacterium	A. woodii A. paludosum	El género Acetobacter comprende un grupo de bacilos Gram negativos, móviles que realizan una oxidación incompleta de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	Reducen autotróficamente compuestos poliméricos, oligómeros, monómeros y CO ₂ , utilizando el hidrógeno como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Género: Eubacterium	E. rectale E. siraeum E. plautii E. cylindroides	El género Eubacterium consiste en un grupo de bacterias anaeróbicas obligadas Gram – positivas.	La mayoría de las Eubacteria sacarolíticas producen butirato como el principal producto de su metabolismo. Muchas especies son capaces de descomponer sustratos complejos a través de mecanismos especiales. Algunas especies se desarrollan autotróficamente,

Fuente: Insam, *et al.*, 2010.

IV.2 Sustratos

La producción de biogás es influenciada por el tipo de biomasa con la que se alimenta al digestor. Esta depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga esta biomasa. El proceso anaeróbico no solo requiere de fuentes de Carbono (C) y Nitrógeno (N) sino también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales como el azufre (S), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), zinc (Zn), cobalto (Co), selenio (Se), tungsteno (W), níquel (Ni) y otros menores (Riofrio, 2008).

Lo más conveniente es equilibrar la mezcla de biomasa para alimentar al digestor (co- digestión). El equilibrio busca la producción de una mayor cantidad de biogás y una biomasa de alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento de las bacterias. Normalmente los estiércoles contienen estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos agroindustriales, puede presentarse el caso de que sea necesaria la adición de otros nutrientes

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



esenciales. (Moncayo-Romero, 2008), la dilución de la biomasa debe ser entre un 5 y 15 % de masa seca (Riofrio, 2008).

IV.3 Parámetros evaluados durante el proceso de DA.

4.3.1. Sólidos totales

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla de sustratos y co-sustratos, con que se carga el digester es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente (Tabla 1).

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semi continuos no debe tener más de un 8 a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60 % de sólidos totales. Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca (Moncayo, 2008).



Tabla 3. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.

Materias primas	Datos promedios
Residuos animales	% ST
Bovinos	13.4-56.2
Porcinos	15-49
Aves	26-92
Caprinos	83-92
Ovejas	32-45
Conejos	34.7-90.8
Equinos	19-42.9
Excretas humanas	17
Residuos vegetales	
Hojas secas	50
Rastrojo maíz	77
Paja trigo	88-90
Paja arroz	88.8-90
Leguminosas (paja)	88.8-92.6
Tubérculos (hojas)	60-80
Hortalizas (hojas)	10.0-15.0
Aserrín	74-80

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

4.3.2. Sólidos volátiles

Los SVT contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (Varnero Moreno, 2015) De igual forma, ICAITI (1983), menciona que, los SVT están inmersos en los ST, y estos son degradados para producir biogás durante la digestión anaeróbica. Este componente representa el contenido real de masa orgánica degradable. El valor de la concentración de sólidos volátiles es necesario para calcular la carga orgánica volumétrica (COV en kg m^3) con la cual se alimenta el biodigestor (Moncayo-Romero, 2008).

4.3.3. Agitación

El objetivo principal es la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas. Asimismo, evita la generación de espumas y la formación de

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



costras, la sedimentación del reactor, la combinación del sustrato y las bacterias, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos”, sin actividad biológica (Varnero, 2011). En función del volumen, de las características del digestor y del residuo, la potencia necesaria para cubrir la demanda energética de la agitación va a variar. Normalmente son valores comprendidos entre 10 y 100 Wh/m³·día. Se suele recomendar valores superiores a 30 Wh/m³·día (Bibing, 2017). Los valores de agitación en RPM para una agitación adecuada varían dependiendo de las características del sustrato y de la carga orgánica, Kim (2011), reporta un valor de 25 RPM y Riaño et. al. (2014) reporta un valor de 55, diferente a lo reportado por Liu *et al.* (2015) con un valor de 100 RPM y mayor a lo que reporta Gómez *et al.* (2005), con valores entre 200 y 80 RPM.

4.3.4. Potencial de hidrógeno (pH)

Indica la concentración de iones hidrógenos en una solución. El pH representa el grado de acidez, es una variable fundamental en los sistemas anaerobios el rango óptimo oscila entre 6.6 y 7.6 cuyo valor es el adecuado para que el reactor opere correctamente, valores de pH por debajo de 5 y por encima de 8 se corre el riesgo de inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo (AGROWASTE, 2013; BMELV, 2010).

Otros autores como Cervantes *et al.* (2006), mencionan que el pH óptimo para la digestión mesofílica es el neutral, valores inferiores a 6.3 o superiores a 7.8 inhiben la producción metanogénica. El pH dentro de un digestor anaerobio disminuye debido a la producción de ácidos volátiles, sin embargo, como las bacterias formadoras de metano consumen estos compuestos y los convierten en CH₄ y CO₂, el pH del digestor incrementará y se estabilizará (Gerardi, 2003). Una excesiva acumulación de amonio a causa de la degradación del nitrógeno incrementa el pH e inhibe el proceso de digestión (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012).



4.3.5. Temperatura

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos psicrófilos (por debajo de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación. La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para gases tales como NH_3 , H_2 y H_2S , dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del CO_2 provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en lodos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por NH_3 (Varnero Moreno, 2015).



4.3.6. Tiempo de retención Hidráulica (TRH)

Determina el tiempo en el que existe cierto sustrato en un biorreactor. La velocidad de carga orgánica tiene una fuerte relación con el TRH ya que si el sustrato contiene componentes orgánicos estables con una alta velocidad de carga orgánica se obtiene un TRH más corto. Las bacterias requieren de un tiempo para degradar la materia orgánica. La temperatura juega un rol importante, a mayor temperatura menor es el TRH para obtener una buena producción de biogás. (Varnero, 2011). Caldera *et al.* (2003), demostraron resultados en la eficiencia del reactor UASB para tratar efluentes cárnicos con TRH de 12, 24 y 36 horas.

4.3.7. Potencial óxido-reducción (Redox)

Para adecuado crecimiento de los anaerobios obligados el valor del potencial Redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. Cuando se cultivan metanogénicas, se incorporan agentes reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial Redox adecuado (Varnero Moreno, 2015).

4.3.8. Demanda química de oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007).

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de



sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas, 40-60%, hidratos de carbono, 25-50%, y grasas y aceites, 10%. La Demanda Química de Oxígeno, DQO, es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua (HANNA® INST. 2017).

4.3.9. Determinación de nitrógeno total

El nitrógeno total se determina frecuentemente en los análisis de rutina, sin embargo, es escasa su utilidad como indicador de la disponibilidad del nitrógeno en el suelo para las plantas, debido a que la mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma orgánica con muy bajas tasas de mineralización. Se referencia como índice de las reservas orgánicas, es la estratificación de sistemas productivos y en los balances en el suelo. La determinación de nitrógeno total por este procedimiento involucra dos pasos: Digestión de la muestra para convertir el nitrógeno a NH_4^+ y la determinación de NH_4^+ en el digestado.

La digestión de la muestra es desarrollada por calentamiento de la muestra con ácido sulfúrico concentrado y sustancias como el K_2SO_4 que promueven la oxidación de la materia orgánica y la conversión del nitrógeno orgánico a amonio por incremento de la temperatura de digestión y también emplea catalizadores como el **Cu** y **Se**, que aumentan la velocidad de oxidación de la materia orgánica por el ácido sulfúrico. El amonio en el digestado es determinado por titulación del amonio liberado por destilación del digestado con álcali. Este análisis se realizará como lo indica la técnica **AS-25** de la **NOM-021-RECNAT-2000** (DOF, 2000).

4.3.10. Condiciones para la digestión anaerobia

En la DA es importante mantener las condiciones óptimas que permitan la realización de las reacciones químicas. Además, que los microorganismos puedan llevar a cabo las reacciones bioquímicas intracelulares que le dan vida.



IV.4 Productos de la digestión anaerobia

4.4.1. El metano y el biogás

Durante el proceso de digestión anaerobia parte de la materia orgánica se transforma en metano y no es el único gas que se produce en la degradación de materia orgánica. La digestión anaerobia da como resultado la obtención de productos principales se trata de una mezcla de gases conocida como biogás y un efluente estabilizado llamado biol. El biogás está compuesto por un 60 % de metano (CH_4), aproximadamente un 35 % de dióxido de carbono (CO_2), 4 % de vapor de agua y estimativamente un máximo de 1 % de H_2S . Sin embargo, diversos estudios han demostrado que el biogás puede contener 577 compuestos trazas incluyendo hidrocarburos halogenados, alcanos superiores (mayores a C_2) e hidrocarburos aromáticos. Normalmente los compuestos trazas constituyen solo el 1 % del volumen de biogás (Morero *et al.*, 2010). En la Tabla 2, Se mencionan las principales características del biogás.

Tabla 4. Características generales del biogás.

Características	Valores
Composición	55-70% metano (CH_4) 30-45% dióxido de carbono (CO_2) Trazas de otros gases, (hidrogeno, nitrógeno, oxígeno siloxanos)
Contenido energético	6.0-6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de exposición	6-12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750 °C (con el contenido de CH_4 mencionado).
Presión óptica	74-88 atm.
Temperatura critica	-82.5 °C

Fuente Doublein y Steinhauer, 2008.



4.4.2. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es común en la naturaleza. Es un gas importante del proceso metabólico de los organismos y es uno de los componentes más importantes en el biogás. Ocupa entre el 30 a 40 % del volumen total de este último. El dióxido de carbono es un compuesto incoloro e inodoro que en concentraciones bajas no es tóxico y en concentraciones altas provoca alta frecuencia respiratoria. Es fácilmente licuable en compresión, sin embargo, cuando se enfría a presión atmosférica se condensa formando hielo seco. El dióxido de carbono es soluble en agua y la solución resultante puede ser ácida como resultado de la formación de ácido carbonilo, esto hace que el CO₂ pueda ser corrosivo en presencia de agua (Coto y Maldonado, 2005).

4.4.3. Ácido sulfhídrico (H₂S)

El ácido sulfhídrico (H₂S) está contenido naturalmente en el petróleo crudo, gas natural, gases volcánicos y manantiales de aguas termales. También se puede producir como resultado de la degradación bacteriana de materia orgánica. Es además producto de la fermentación de los desperdicios de animales y humanos. El ácido sulfhídrico también puede ser producido por actividades industriales, tales como procesamiento de alimentos, fábricas de papel, curtidurías y refinerías de petróleo (ATSDR, 2004).

El H₂S es un gas inflamable, incoloro, con un olor característico a huevos podridos. Se le conoce comúnmente como ácido hidrosulfúrico o gas de alcantarilla. La gente puede detectar su olor a niveles muy bajos (ATSDR 2004). Según Botero y Preston (1987), el ácido sulfhídrico es un compuesto que se encuentra en concentraciones próximas al 1 % en el biogás, pero esta baja concentración es suficiente para que pueda ocasionar daños graves a estructuras de metal o equipos.



4.4.4 Purificación del biogás

El biogás además de que contiene CH_4 y (CO_2) , también está compuesto de contaminantes tales como ácido sulfhídrico (H_2S) y siloxanos. La presencia de estos compuestos es perjudicial para cualquier equipo de procesamiento de biogás y producen emisiones contaminantes.

Por lo tanto, es importante considerar etapas de purificación antes de utilizar el biogás. Uno de los métodos más factibles es la de absorción química ya que es un diseño muy sencillo, con un bajo costo de inversión, principalmente se usa para remover H_2S , CO_2 y vapor de agua. La eficiencia es mayor, aunque dependerá del compuesto químico utilizado (Vijay et al. 2006). Uno de los compuestos más utilizados para la remoción del H_2S y CO_2 es el hidróxido de sodio (NaOH) y carbonato de calcio (CaCO_3). La razón principal para purificar el biogás es para aumentar el enriquecimiento de biogás, aumento del valor calorífico y calidad consistente del biogás (Viquez et al., 2010).

IV.5 Aprovechamiento del biogás

El poder calorífico del biogás es determinado por la fracción del metano, que puede variar entre 50% hasta 80%. Con una concentración de 40% de metano, el poder calorífico equivale a 14.3 MJ/m³, y puede alcanzar 28.6 MJ/ m³ con una concentración de 80% de metano. El biogás al salir del digestor está saturado con vapor de agua, lo cual reduce el poder calorífico. Dependiendo de la temperatura del digestor, el contenido de vapor de agua puede llegar hasta el 6%, por lo que el poder calorífico del biogás en el sitio es hasta un 15% menor que el valor determinado en el laboratorio, refiriéndose al estado seco (Weber, 2012).

IV.6 Nutrientes

Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión



anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos (AGROWASTE, 2013). La cantidad de nitrógeno y fósforo requerido para la síntesis de biomasa puede calcularse asumiendo la fórmula empírica de una célula bacteriana anaeróbica como $C_5H_7O_2N$. La masa celular consiste de aproximadamente 12 % de nitrógeno, lo cual significa que unos 12 g de nitrógeno se requieren por cada 100 g de biomasa anaeróbica producida. La demanda de fósforo corresponde a $1/7 - 1/5$ de la demanda de nitrógeno. Como regla general, se asume que un 10 % de la materia orgánica removida (DQO) durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa. Esto puede utilizarse para calcular los requerimientos de nitrógeno y fósforo (Moreno, 2014; Flotats, 2016). Además del nitrógeno y el fósforo, se han identificado otras diversas nutrientes trazas como esenciales para los microorganismos anaeróbicos. Los metales trazas tales como Hierro, Cobalto, Molibdeno, Selenio, Calcio, Magnesio, Zinc, Cobre, Manganeseo, Tungsteno y Boro a niveles de mgL^{-1} y la vitamina B12 en niveles de $\mu g/L$, se ha encontrado que mejoran la producción de metano. El Níquel, Cobalto y otros minerales traza son esenciales para la degradación del metanol en un reactor bajo condiciones mesofílicas.

IV.7 Digestatos y mejoradores de suelos

Se define por su aporte de elementos minerales, especialmente nitrógeno. Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales. En función a la carga usada y el proceso seguido, esta materia orgánica, también conocida como bioabono puede presentarse de dos formas: líquida y sólida (FAO, 2011). Schnürer y Jarvis (2010) lo definen como el residuo producto de la degradación de la materia en el proceso de la digestión anaerobia, cual puede ser utilizado como fertilizante, debido que solo una parte del carbono disponible en la materia orgánica se degrada, haciéndolo más fácil de absorber, mientras que el resto de nutrientes se conservan (FNR, 2010).



IV.8 Bio-abono en forma líquida o biol.

Este es proveniente de digestores continuos con una alta tasa de carga y un bajo contenido de sólidos totales (inferior al 12 %), el inconveniente de éste es su comercialización por el estado físico de su presentación (FAO, 2011). El biol generalmente contiene mayor concentración de nutrientes que la fracción sólida y puede ser utilizado como un fertilizante orgánico foliar (UPME, 2003). La calidad y el contenido nutricional del digestato dependen esencialmente de los materiales utilizados para la digestión anaeróbica, así como del proceso de digestión mismo. Esto es temperatura, tiempo de retención, etc. (Schüerer y Jarvis, 2010).

Tabla 5.-Composición físico química de biol porcino (Bautista, 2016).

Parámetro	Concentración	Parámetro	Concentración	Parámetro	Concentración
Sólidos totales	1.40 %	Nitrógeno total	.26-.30 %	Fosforo total	400 ppm
Sólidos volátiles	0.75 %	Relación c/n	5.3-3.33 %	Potasio total	100 ppm
Ph	6.70-7.90	Nitrogeno amoniacal	200-400 ppm	Potasio disponible	290 ppm
Carbono orgánico	.40-.09 %	Fosforo disponible	48 ppm	Calcio soluble	0.21 %
Magnesio soluble	0.14 %	Zinc	.05 ppm	Cobre	.017 ppm
Azufre	.33 ppm	Manganeso	0,0005 ppm	Boro	.0005 ppm

IV.9 Bio-abono en forma sólida

Proveniente de digestores batch o semicontinuos con buen poder fertilizante, que luego de ser secado se puede comercializar sin problemas.

En general todos los productos orgánicos obtenidos, independientemente del proceso utilizado para su estabilización, son buenos acondicionadores o mejoradores de las propiedades físicas de los suelos, porque aportan niveles interesantes de materia orgánica estabilizada. Presentan una textura física particular, de baja densidad (del orden de 0.5 gr cc-1) y baja resistencia mecánica; por lo tanto, la incorporación de estos substratos orgánicos en el suelo permite mejorar la estructura de éste, reduciendo problemas de compactación y



susceptibilidad de erosión; además, incrementan la capacidad de retención de agua, así como el intercambio gaseoso, favoreciendo el desarrollo radical. Sin embargo, la clasificación como biofertilizante, depende de las características bioquímicas de las materias primas utilizadas, de forma que, si éstas contienen altos niveles de nutrientes, generarán productos con características de fertilizantes orgánicos.

Tabla 6.- Comparaciones en función de valores promedios de algunos de los análisis químicos.

Parámetros	Compost	Bioabono
pH (H ₂ O 1:5)	7.2	7.9
MO(W-B) 1:5	20	45
MO(Calcinac. %)	39	58
N Total (Kjeldal %)	1	1.8
P Total (%)	4.1	8.4
K Total (%)	0.4	0.7
Relación C/N	19	25
N mineral (mg/kg)	550	30
C.E. (dS/m)	10.1	14.4



V. OBJETIVOS

V.1 Objetivo General.

Evaluar el proceso de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) en la producción de biogás.

V.2. Objetivos particulares.

- V.2.1. Calcular la composición porcentual teórica de biogás obtenido por la degradación anaerobia de lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*).
- V.2.2. Evaluar los parámetros de control de un proceso de biodigestión anaerobia vs codigestión.
- V.2.3. Determinar la composición porcentual real de biogás obtenido por la degradación anaerobia de lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) vs la codigestión.
- V.2.4. Evaluar los parámetros finales de la biodigestión.

VI. HIPÓTESIS

Los procesos de digestión y codigestión anaerobia de la *Pista Stratiotes* no son factibles en la producción de biogás.



VII. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para llevar cabo el cálculo de la composición porcentual teórica de biogás obtenido por la degradación anaerobia de lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) que se utilizó en el proceso de digestión anaerobia, se realizaron las siguientes actividades.

VII.1 Colecta y procesamiento de los sustratos.

La lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), fue colectada en la laguna artificial de agua dulce que se encuentra dentro de las instalaciones de la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicada en el km 0.5 de la carretera Villahermosa-Cárdenas. El material orgánico se transportó a la planta piloto de Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos de la misma división para su preparación y proceso. La lechuga de agua colectada se lavó con agua potable, después se molió en una licuadora industrial marca International® modelo LI-17-VT0. Y por último una parte de la molienda de la lechuga de agua se llevó a un horno Felisa® serial 201100422 a 103.5°C durante 24 h basado en la NMX-AA-016-1984 para la eliminación de la humedad.

Los co-sustratos como el contenido ruminal gástrico vacuno (Rumen) y sangre bovina se obtuvieron del proceso de sacrificio en un rancho ganadero privado del municipio de Reforma, Chiapas, México.

VII.2 Análisis elemental.

Una vez preparada la muestra se molió con un mortero de Ágata para tener una fracción más fina y se envasaron en viales de 5mL. Se tomaron 3 muestras y se enviaron al Laboratorio de Análisis Elemental de la Unidad de Servicios de apoyo a la Investigación en la Facultad de Química de la UNAM.

La determinación analítica se llevó a cabo por triplicado. Se utilizó un Analizador Perkin Elmer® modelo PE 2400 que da información del contenido porcentual de C, H, N y S si están presente en la muestra. Para ello se pesó entre 1 y 3 mg de muestra y adicionalmente se fijaron los valores de los parámetros analíticos

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



siguientes: tipo de programa utilizado, temperatura de la columna cromatográfica, así como temperaturas del reactor de combustión y tiempo de medición como se muestra a continuación:

- Gas acarreador/gas de referencia: Helio
- Temperatura de la columna cromatográfica: 82.2 °C
- Detector: Conductividad Térmica
- Presión: 116.2 mm Hg
- Temperatura del reactor de combustión: 975 °C
- Temperatura del reactor de reducción: 501 °C
- Programa analítico: CHNS
- Tiempo de análisis: 430 segundos
- Compuesto de calibración: Cistina, reactivo analítico marca Perkin Elmer®.

VII.3 Obtención de la fórmula química

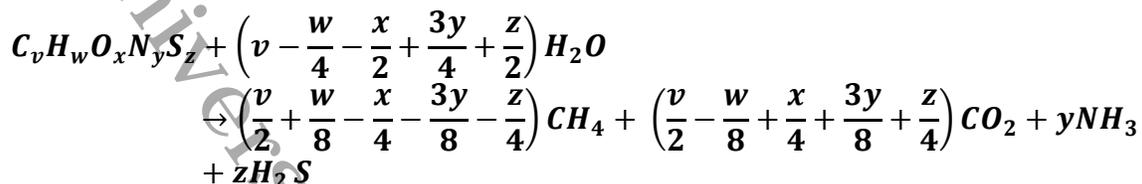
Para obtener la fórmula química, se realizó el recalcó del porcentaje de oxígeno presente en la muestra analizada, por diferencia al 100% de la suma de los porcentajes obtenidos para todos los demás elementos. Se obtuvieron las proporciones atómicas relativas de cada elemento dividiendo su porcentaje en peso entre su peso atómico. A partir de estas proporciones atómicas relativas se dedujeron las relaciones atómicas dividiendo cada uno de los valores entre el menor.

VII.4 Determinación de la masa de los gases

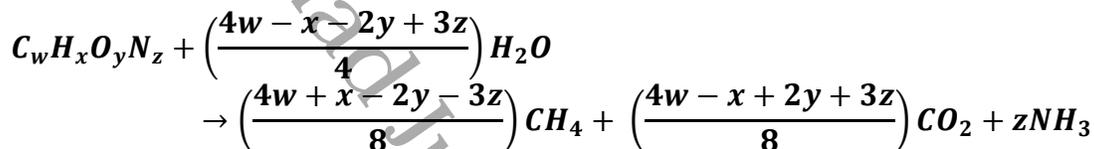
Se estimó la masa de los gases utilizando la fórmula química obtenida de acuerdo a la Ecuación 1 para residuos con azufre en su composición y la Ecuación 2 para residuos que no contienen azufre (Tchobanoglous *et al.* 1998).



Ecuación 1



Ecuación 2



La masa de los gases, se determinó de acuerdo a la ecuación siguiente. Se utilizó como base 100 kg de residuos orgánicos.

Ecuación 3

$$Masa\ del\ gas\ (kg) = \frac{Masa\ del\ gas\ en\ la\ ec.\ balanceada}{Masa\ del\ residu\ orgánico\ en\ la\ ecuación} (ST)$$

VII.5 Cálculo del volumen de los gases

Se convirtió la masa de los gases en volumen, aplicando la ecuación 4.

Ecuación 4

$$Volumen\ del\ gas\ (m^3) = \frac{Masa\ del\ gas\ (kg)}{Densidad\ del\ gas\ (kg/m^3)}$$

Basado en el peso seco del material orgánico, se determinó en m³/kg la cantidad total teórica de biogás generado por peso unitario de cada residuo, usando 100 kg como base. De igual forma se determinó para el material húmedo.

VII.6 Cálculo de producción de biogás para las co-digestiones

Con los datos obtenidos, se puede calcular la cantidad de biogás teórico de mezclas utilizando la ecuación 5.



Ecuación 5

$$\begin{aligned} \text{Biogás en la codigestión (m}^3\text{)} \\ = (\text{Masa del Sustrato} * \text{Volumen de biogas que genera}) \\ + (\text{Masa del Cosustrato} * \text{Volumen de biogas que genera}) \end{aligned}$$

VII.7 Evaluación de los parámetros del proceso de digestión y codigestión anaerobia

Para llevar cabo la evaluación de los parámetros del proceso de digestión y codigestión anaerobia, se realizaron las siguientes actividades.

VII.8 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado de un factor, que consistió en 4 tratamientos y 3 réplicas por cada tratamiento (Lv, LvRum, LvSan, Ls) de digestión y codigestión anaerobio para la producción de Biogás y el monitoreo de control de los parámetros físicos y químicos de ST, SV, Ceniza, pH, CE, ORP, DQO, temperatura, y COT con excepciones de N, P y K evaluados únicamente al final del proceso. Las unidades experimentales que se utilizaron son reactores a escala piloto de vidrio con capacidad de 1L. El número de observaciones por cada tratamiento fue de tres, teniendo un total de 12 reactores. Cabe mencionar que se utilizó una relación carbono – nitrógeno 25/1 para los tratamientos con codigestión anaerobia (SEMARNAT, 2010) (Tabla 7).

Tabla 7. Composición de los tratamientos.

N°	Tratamiento	Replicas	Composición
1	Lv	3	Lechuga verde
2	LvRum	3	Lechuga verde con Rumen
3	LvSan	3	Lechuga verde con Sangre
4	Ls	3	Lechuga seca

VII.9 Montaje de Reactores y Monitoreo del proceso de digestión anaeróbica.

Los tratamientos fueron preparados de la siguiente manera, el Tratamiento N°1 con 300 g de lechuga verde; el Tratamiento N°2 con 300 g de lechuga verde + 45 g de



contenido ruminal gástrico; el Tratamiento N°3, con 300 g de lechuga verde + 45 g de sangre bovina y Tratamiento N°4 con 20 g de lechuga seca (equivalente a 300 g de lechuga verde). A todos los tratamientos se les agregó 20 ml de inóculo provenientes del biodigestor ubicado en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) de la DACBiol-UJAT, y fueron aforados a 900 ml de su capacidad máxima, con la que se activó el proceso de anaerobiosis en los tratamientos. A cada reactor se le adaptó una manguera conectada a un reservorio (bolsa tipo Tedlar fabricada en la planta piloto de tratamiento atmosférico y de residuos sólidos de la división), con capacidad de 4.5 litros, para el almacenamiento del biogás que fue generado en el proceso. Igualmente, a cada recipiente se le agregó un agitador magnético de 3 centímetros de largo, para asegurar la homogenización del material durante el tiempo del experimento, la cual se realizó diario por 20 min al día durante 60 días.

Para la determinación de los parámetros más importantes del proceso de digestión anaeróbica y producción de biogás, se tomaron muestras de los biorreactores en el día 0 (inicio del proceso), a los 30 días de iniciado el proceso (intermedio) y a los 60 días (final).

VII.10 Determinación de los parámetros fisicoquímicos.

Durante el proceso, se monitorearon los siguientes parámetros: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Potencial Óxido Reducción (ORP, por sus siglas en inglés), Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), % Cenizas, Carbono Orgánico Total y Demanda Química de Oxígeno (DQO); así como los nutrientes N, P y K al final del proceso.

7.10.1. Determinación del pH, Conductividad Eléctrica y ORP.

La determinación de pH se realizó de acuerdo con la técnica AS-02 de la **NOM-021-RECNAT-2000** (DOF, 2000), donde se pesaron 5 g de cada muestra colocándolos en un vaso precipitado y se le adicionaron 25 ml de agua destilada y se agitaron durante 10 minutos, posteriormente se calibró el potenciómetro con la solución

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



reguladora a pH 7, después se enjuagó el electrodo con agua destilada y se introdujo en la suspensión de la muestra y se anotó el pH cuando la lectura ya se había estabilizado.

La determinación de la conductividad eléctrica se realizó con lo establecido en la técnica AS-18 de la **NOM-021-RECNAT-2000** (DOF, 2000), donde se pesaron 5 g de cada muestra colocándolos por cada muestra en un vaso de precipitados y se le adicionó 25 ml de agua destilada y se agitaron durante 10 minutos, posteriormente se introdujeron los electrodos en la suspensión de la muestra y se anotó la CE cuando la lectura ya se había estabilizado.

La determinación de ORP con un equipo multiparamétrico marca Hanna 211®.

7.10.2. Determinación de SV, ST y Ceniza.

A cada una de los tratamientos se le analizó por triplicado la humedad con base a la **NMX-AA-16-1984**, colocando las cápsulas a 103 °C durante 24 horas, transcurrido el tiempo se sacaron del horno y se colocaron en el desecador, dejando enfriar durante 15 minutos, por último, se pesaron las cápsulas.

Se midieron los sólidos volátiles totales con base en la **NMX-AA-034-2001** tomando tres repeticiones de la muestra. Se colocaron tres cápsulas de porcelanas en una mufla a una temperatura de 550 °C durante 20 minutos, después de este tiempo se transfirieron a la estufa a 103 °C durante 20 minutos, se retiraron de la estufa y se dejaron enfriar en un desecador.

Para la determinación de cenizas de acuerdo a la **NOM-AA-18-1984**, se introdujeron las cápsulas a la mufla a una temperatura de 800 °C, durante 20 minutos, luego se pasaron las cápsulas a la estufa a 103 °C durante 10 minutos y finalmente se colocaron en el desecador durante 15 minutos. Se pesaron las cápsulas.



7.10.3. Determinación Materia Orgánica (MO)

Se determinó utilizando el método de calcinación a 550°C, reportado por Sandzawka et al. (2005). Para calcular el porcentaje de materia orgánica se aplicó la siguiente fórmula:

Ecuación 6

$$\% MO = 100 - \% cenizas$$

Dónde:

% MO = es la materia orgánica expresada en porcentaje.

% Cenizas = es la ceniza calculada en la determinación anterior.

7.10.4. Determinación Carbono Orgánico Total (COT)

Para estimar el carbono orgánico total a partir de la materia orgánica se debe utilizar el factor van Bemmelen (Sandzawka et al., 2005), que puede variar para distintos tipos de suelos. Donde se aplicó la siguiente fórmula para determinar este parámetro.

Ecuación 7

$$\%CO = \frac{\% MO}{1.724}$$

Dónde:

CO = Carbón Orgánico

MO = Materia Orgánica

Factor Van Benmelen = 1.724

7.10.5. Determinación de DQO

La DQO se determinó por el método de Tubo Sellado y titulación de **la NMX-AA030/2-SCFI-2012**. El método consiste en transferir 2.5 mL de la muestra al tubo de reacción y diluir, agregando 0.1 g de sulfato de mercurio (HgSO₄), 1.5 mL de la



disolución de dicromato de potasio y 3.5 mL de la mezcla sulfato de plata-ácido sulfúrico. El tubo de reacción preparado se lleva al termoreactor a una temperatura de 150 °C durante 120 minutos. Pasado el tiempo de digestión, la muestra se deposita en un matraz Erlenmeyer, lavando los tubos de ensayos y agregando los lavados al Erlenmeyer. Se agregan dos gotas de indicador de Ferroína y se titula con solución ferrosa amoniacal, hasta la aparición de un color rojo en la muestra, de forma alterna se titula un blanco y un patrón. Finalmente, se registra la cantidad de solución ferrosa amoniacal (FAS, por su sigla en inglés) gastado en la titulación de la muestra.

Para realizar los cálculos de la concentración de masa (mg/L) de la demanda química de oxígeno, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 8

$$DQO_{(mg\ O_2\ L^{-1})} = \frac{(A - B) * N * 8000}{V}$$

Dónde:

A = volumen en mL de FAS gastado en el blanco.

B = volumen en mL de FAS gastado en la muestra.

N = normalidad de la solución de FAS.

V = volumen en mL de la muestra para la prueba.

8000 = es la masa molar de $\frac{1}{2}$ O₂ (O), expresada en mg/mol.

Al otorgar valor al resultado se redondea a la unidad de miligramo por litro más cercana al resultado.

7.10.6. Determinación de Nitrógeno

Se realizó por el método semi Micro-Kjeldah, donde se pesó 0.1 g. de muestra, y al cual se agrega en un matraz de bola, se le adicionaba 1.1 g de catalizador de nitrógeno, y 3 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄); se lleva a la cámara de digestión donde se deja a 150 °C por 1 hora o hasta que la Materia Orgánica (MO) se oxida indicado por los vapores de color café.



Posteriormente se llevó al proceso de destilación, donde se le agregan 10 ml de agua destilada al matraz de bola se agita y se traspasa a un matraz micro-Kjeldahl; se coloca en el tubo de salida del aparato de destilación un matraz Erlenmeyer de 125 mL de capacidad con 10 mL de la solución de ácido bórico con indicador. Se adicionan 10 mL de NaOH (Hidróxido de Sodio) al bulbo de destilación y la mezcla se vuelve oscura. Se conecta el flujo de vapor y se inicia la destilación. Se destilan aproximadamente 50 mL. El nitrógeno amoniacal se determinó por titulación con ácido sulfúrico 0.05 N. El punto de equivalencia de la titulación ocurre cuando la solución vira de verde a rosado.

7.10.7. Determinación de Fósforo (P)

Se realizó de acuerdo al Métodos de análisis de suelos y plantas, establecido en la técnica de Rodríguez y Rodríguez, 2002, se pesaron 1 g de muestra de composta previamente secada, triturada y tamizada y se colocó en un crisol de gooch y se incineró 1 h en la mufla a una temperatura de 550°C; pasando la hora, se enfrió el gramo de suelo y se humedeció con agua destilada para después agregarle aproximadamente 2 ml de ácido clorhídrico (HCl) concentrado. Se llevaron a una parrilla eléctrica para que se evaporara muy lentamente, después se le agregaron 25 ml de una solución de HCl 1 N y luego se filtraron. Del líquido filtrado, se transfirió una alícuota de 2 ml a un matraz volumétrico de 100 ml, donde se agregaron 10 ml de reactivo molibdato de amonio-vanadato de amonio y se aforó con agua destilada. Se esperó 15 min a que desarrollara el color y se efectuó la lectura de absorbancia a 470 nm (nanómetros), con el espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys.

7.10.8. Determinación de Potasio (K)

Se peso 1 g de muestra y se le agregaron 50 ml de agua destilada, se agitó durante 10 min y posteriormente se llevó a la centrífuga a 3500 rpm (revoluciones por minuto) durante 5 minutos, una vez transcurrido el tiempo el sobrenadante se transfirió a un vaso de precipitados de 50 ml y se le adicionaron 6 g de carbón activado, se agitó y se deja reposar para después llevar a cabo la filtración con



bomba de vacío. De la muestra filtrada se tomaron 2 ml y se colocaron en un vaso precipitados, donde se le agregaron 48 ml de agua destilada, de la dilución se tomaron 10 ml y se transfirieron a las cubetas de vidrio para fotómetros Hanna (HI 731331) y se le agrego 6 gotas de Potassium Reagent A Hi 93750-03 y se colocó en el equipo de Hanna Instruments Bench Meters HI83200, donde se llevó a cero, se extrajo la cubeta y se le agregó un sobre de potasio y se introdujo de nuevo la cubeta al equipo para anotar las lecturas.

VII.11 Determinación de la composición porcentual real de biogás.

Para llevar cabo la determinar la composición porcentual real de biogás obtenido por la degradación anaerobia de lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) vs la codigestion, se realizaron las siguientes actividades.

Para la medición de la producción real de biogás se utilizó un analizador portátil OPTIMA BIOGAS 7®, el cual se realizó una vez alcanzada la capacidad de almacenamiento de las bolsas, el equipo mide simultáneamente los niveles de CH₄ (%), H₂S (ppm), CO₂ (%) y O₂ (%) y presión hasta 300 HP.

De igual manera, se tomaron muestras de biogás por tratamiento al final del proceso, que fueron llevadas en los reservorios (bolsas tipo Tedlar), para determinar la composición de gases presentes, por espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), registrando absorbancia en un espectrómetro Thermo Nicolet (Nexus 670-FTIR) equipado con un detector de Sulfato de Triglicina Deuterada (DTGS) ubicado en el Laboratorio de Física Aplicada del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Campus Mérida, Yucatán. La Tabla 8 se muestran frecuencias de grupo para los gases principales en el biogás.



Tabla 8. Frecuencia de grupo para gases.

Gas	Frecuencia de grupo (cm ⁻¹)	Asignación
CH ₄	1306 / 3019	Deformación (triple degenerada) / estiramiento (triple degenerado) ^a
CO ₂	667 / 2349	En y fuera del plano de plegado / Estiramiento asimétrico en llano ^a
NH ₃	450 / 530 / 1200-1400 / 2800-3200	Deformación simétrica / Deformación asimétrica (doblemente degenerada) / Estiramiento asimétrico (doblemente degenerado) / Muy agudo ^{a,b}

^aHousecroft and Sharpe (2008); ^bStine (1975).

Para llevar cabo la Evaluación de los parametros finales de la biodigestion de la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) vs la codigestion, se realizaron las siguientes actividades.

Para verificar la presencia de grupos funcionales compuestos presentes en los extractos residuales, se realizó un análisis de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) THERMO SCIENTIFIC®. Ubicado en el Laboratorio de Química Sustentable de la Universidad Popular de la Chontalpa Cárdenas, Tabasco. La Figura 2 muestra las frecuencias de grupos funcionales principales (Rebuffo, 2007; Yu, 2005).

Rango Espectral (cm ⁻¹)	Interpretación espectral (Grupos funcionales)
3600-3000	Enlaces O-H (hidroxilo) y N-H(amino). Grupos funcionales muy inestables.
3000-2800	Estiramientos simétricos y asimétricos de los enlaces C-H de las cadenas de ácidos grasos y grupos metilo, estiramiento del enlace O-H de grupos hidroxilo y del enlace N-H de proteínas.
2841-2.686-	Lípidos, correspondiente a paredes celulares.
1800-1650	Estiramiento del doble enlace C=O de ésteres y grupos carboxilo, estructuras secundarias de proteínas (amida I y II).
1650-1380	C-H (ácidos grasos)
1500-1200	Proteínas (amida III), estiramiento asimétrico del enlace P-O de grupos fosfato y formación del enlace C-H.
1290-1180	Hidratos de carbono como polisacáridos extracelulares.
1200-600	Huella dactilar, estructuras cuaternarias de las proteínas y otras macromoléculas.

Figura 2. IR de Grupos Funcionales.



Para la determinación de Nutrientes se analizó todo el extracto residual (sólido y líquido) como producto final del proceso de digestión, el cual se utilizaron los siguientes métodos.

VII.12 Análisis estadístico

Se utilizó un análisis estadístico no paramétrico de Anova Kruskal-Wallis de un factor para encontrar diferencias estadísticas entre todos los tratamientos evaluados) con un nivel de confianza de 95% bajo la prueba de Nemenyi, seguido de un contraste de medianas de Mann-Whitney. Los análisis de datos se llevaron a cabo en el paquete estadístico Statgraphics®Centurion XVI.I (Statpoint Technologies, 2010). En caso de las Variables que Cumplan con la estadística paramétrica se aplicó un análisis de varianza de un factor, seguido de un contraste múltiple de tukey. Las gráficas se generaron empleando el programa SigmaPlot® versión 12.0.



VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VIII.1 Área de estudio

La Figura 2, muestra la laguna artificial de agua dulce donde se recolectó el sustrato. Esta laguna se encuentra dentro de las instalaciones de la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicada en el km 0.5 de la carretera Villahermosa-Cárdenas. En dicha laguna se puede observar durante el año la proliferación de la Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*).



Figura 3. Fotografía aérea de la laguna artificial de agua dulce con *Pistia Stratiotes* (ACUTUS).

VIII.2 Análisis Elemental.

La Figura 2, muestra los viales para el análisis elemental de lechuga de agua seca por triplicado. Estos se enviaron al Laboratorio de Análisis Elemental de la Unidad de Servicios de apoyo a la Investigación en la Facultad de Química de la UNAM. para tener una fracción más fina de la muestra se utilizó un mortero de ágata.



Figura 4. Fotografía de los viales con Lechuga de agua seca para Análisis Elemental.



La Tabla 9, muestra el contenido elemental de la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) obtenido en el analizador Perkin Elmer PE2400. En esta tabla, se observan los resultados por triplicado para el C, H, N y S. Los resultados de la tabla son reportados en porcentajes en peso.

Tabla 9. Contenido elemental de *Pistia Stratiotes* por Equipo Perkin Elmer modelo PE2400.

Muestra	Muestra analizada (mg)	%	%	%	Promedio (%)
		Experimental 1	Experimental 2	Experimental 3	
Lechuga de agua	2.193	C=29.36	C=29.71	C=29.74	C=29.603
		H=3.97	H=4.09	H=4.00	H=4.020
	2.382	N=2.46	N=2.21	N=2.14	N=2.270
	2.083	*S=0.29	*S=0.30	*S=0.33	*S=0.307

La Tabla 10, muestra el contenido elemental recalculado de la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*). En esta tabla, se observan los resultados por triplicado más la desviación estándar, proporciones atómicas relativas y relaciones atómicas del C, H, N y S. No todos los resultados de la tabla son reportados en porcentajes en peso.

Tabla 10. Contenido elemental recalculado de la lechuga de agua.

Cantidad de muestra analizada	Elemento	1er análisis (%)	2er análisis (%)	3er análisis (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Proporciones atómicas relativas (gr/mol)	Relaciones atómicas
2.1930	C	29.3600	29.7100	29.7400	29.6033	0.2113	2.4647	16.0
	H	3.9700	4.0900	4.0000	4.0200	0.0624	3.9841	25.0
2.3820	O	-	-	-	30.3900	-	1.8995	12.0
2.0830	N	2.4600	2.2100	2.1400	2.2700	0.1682	0.1621	1.0
	S	0.2900	0.3000	0.3300	0.3067	0.0208	0.0096	1.0



La Tabla 11, muestra la fórmula química obtenida para la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*). En esta tabla, se observan la estructura química para el C, H, N y S. Es importante determinar la fórmula química del sustrato para determinar la ecuación de la reacción química para la producción de biogás.

Tabla 11. Fórmula química de la Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*).

Sustrato	Fórmula química
Lechuga de agua	$2C_{16}H_{25}O_{12}N S$

La Tabla 12, muestra la ecuación balanceada para la reacción de la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) en el proceso de degradación. En esta tabla, se observan la estructura de la reacción química correspondiente para el C, H, N y S. Con esta ecuación se puede calcular la cantidad teórica de biogás que puede generar la lechuga de agua.

Tabla 12. Ecuación balanceada de la Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*).

Residuo	Reacción
Lechuga de agua	$4C_{16}H_{25}O_{12}N S + 20H_2O \rightarrow 30CH_4 + 34CO_2 + 4NH_3 + 4H_2S$

La Tabla 13, muestra la cantidad teórica de biogás que puede generar la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) en el proceso de digestión anaerobia. En esta tabla, se observan los porcentajes de %CH₄, %CO₂, %NH₃ y %H₂S. Estos datos son una estimación teórica porcentual de producción de biogás de la Lechuga de agua.

Tabla 13. Estimación teórica de Biogás de la Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*).

Residuo	Biogás m ³ /ton (seco)	Biogás m ³ /ton (húmedo)	Biogás m ³ /kg de SV	Composición en volumen (%)				Total (%)
				CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S	
Lechuga de agua	593.78	38.18	0.89	41.27	46.57	5.99	6.17	100



VIII.3 Monitoreo del proceso

8.3.1. pH

La Tabla 14 y la figura 5 muestran los valores de pH del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 5, los datos obtenidos de pH tienden a comportarse similarmente en todo el proceso con una tendencia a pH neutro.

Tabla 14. Valores de pH promedio por tratamiento obtenido durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	6.4	6.4	6.5
T2	LvRum	6.4	6.7	6.7
T3	LvSan	6.4	6.4	6.7
T4	Ls	6.5	6.5	6.8

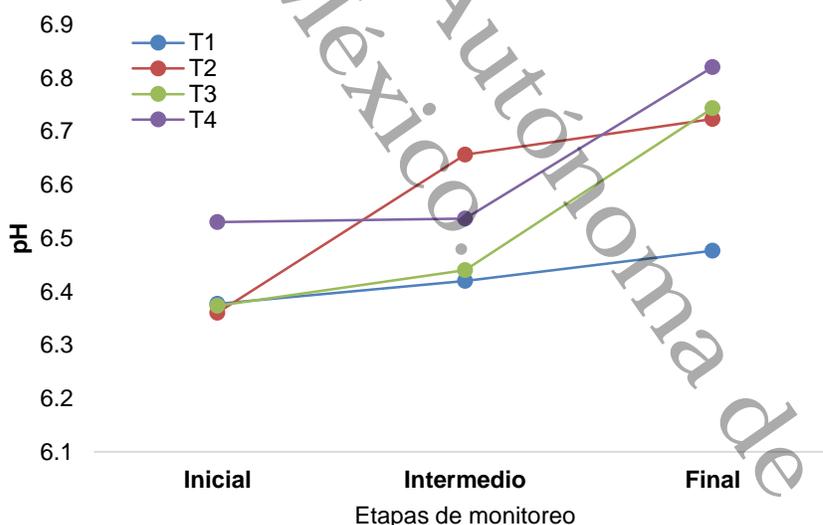


Figura 5. Grafico del comportamiento del pH de los tratamientos.

Se puede observar que los rangos obtenidos de pH de la digestión y codigestión de lechuga de agua están dentro de los rangos (6.5 a 6.8) óptimos para llevar a cabo digestión mesofílica, ya que según Cervantes *et al.* (2006) indica que valores inferiores a 6.3 o superiores a 7.8 inhiben la producción metanogénica, esto es debido a que una excesiva acumulación de amonio a causa de la degradación del



nitrógeno, incrementa el pH e inhibe el proceso de digestión (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012).

8.3.2. Conductividad Electrica (CE)

La Tabla 15, y la figura 6 muestran los valores de CE del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 6, los datos obtenidos de CE tienden a comportarse similarmente al final del proceso, de los tratamientos el t1 fue el más alto en la etapa inicial a comparación de los demás.

Tabla 15. Valores de CE (dS/cm²) promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	11.8	10.8	10.1
T2	LvRum	11.4	10.6	10.0
T3	LvSan	11.9	12.9	13.5
T4	Ls	18.7	17.5	12.7

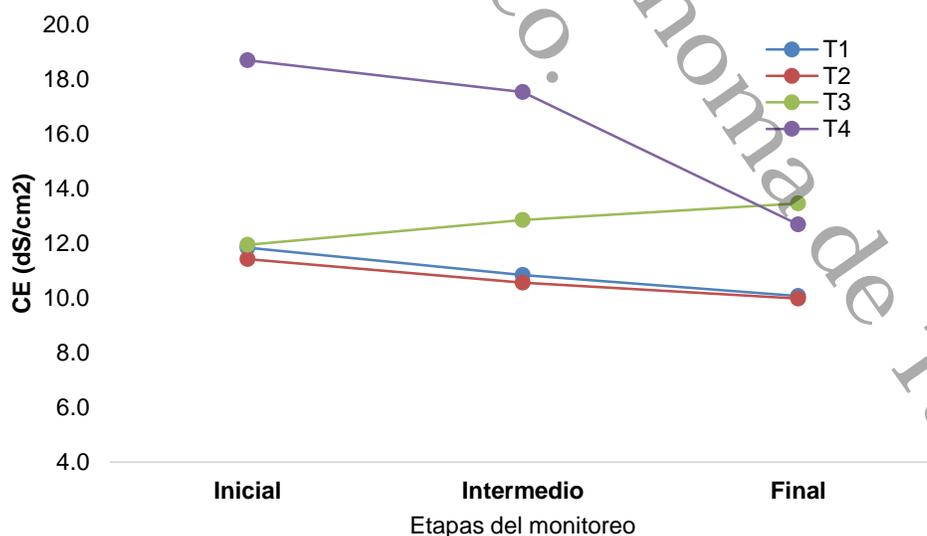


Figura 6. Grafico del comportamiento del CE de los tratamientos.



8.3.3. Potencial Óxido Reducción (ORP)

La Tabla 16 y la figura 7 muestran los valores de ORP del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 7, los datos obtenidos de ORP tienen a comportarse similarmente en todas las etapas, aunque en el T4 se denota un ligero aumento con respecto a los otros tratamientos.

Tabla 16. Valores de ORP promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	-218.3	-244.8	-256.3
T2	LvRum	-225.7	-252.2	-261.6
T3	LvSan	-232.7	-259.2	-273.7
T4	Ls	-277.3	-303.8	-306.4

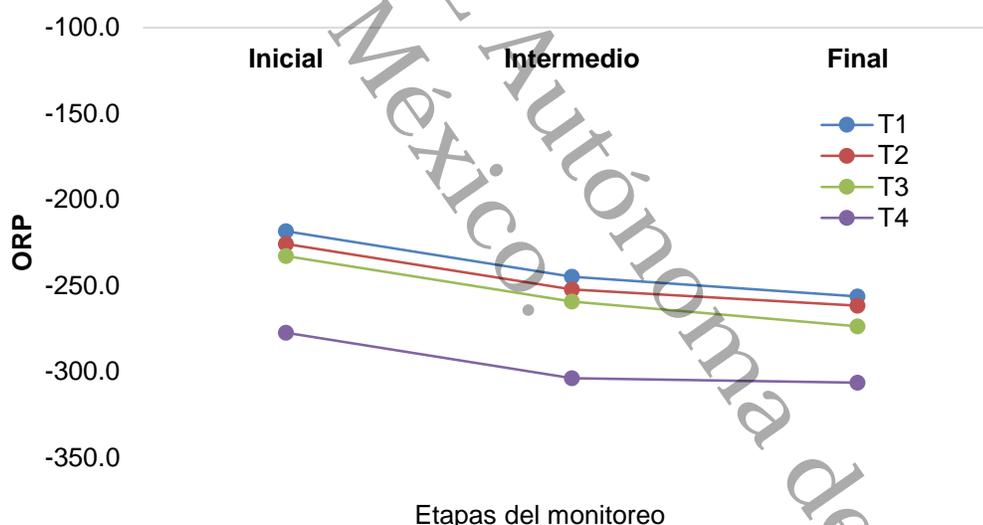


Figura 7. Grafico del comportamiento del ORP de los tratamientos.

El potencial oxido reducción final de la codigestión y digestión (T1 T4 y Ls) de la lechuga de agua oscilaron entre los rangos de -256 a -306, lo cual garantiza un potencial redox adecuado, ya que según Varnero (2015) establece que para un adecuado crecimiento de los anaerobios obligados el valor del potencial Redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. Cuando se cultivan metanogénicas, se incorporan agentes Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial Redox adecuado.

8.3.4. Sólidos Totales (ST)

La Tabla 17, y la figura 8 muestran los valores de ST (%) del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 8, los datos obtenidos de ST (%) tienden a comportarse similarmente al final del proceso, de los tratamientos el T4 fue el más bajo en la etapa inicial a comparación de los demás.

Tabla 17. Valores de ST% promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	4.27	3.83	3.82
T2	LvRum	4.28	4.18	3.30
T3	LvSan	3.48	4.33	3.90
T4	Ls	2.78	3.18	3.68

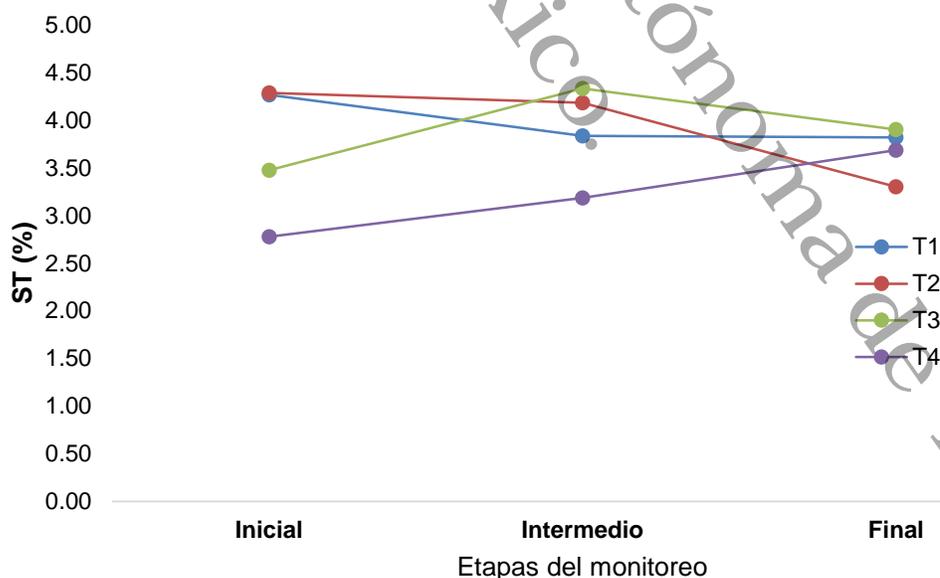


Figura 8. Grafico del comportamiento del ST% de los tratamientos.

Los porcentajes de ST estuvieron en rangos (2.78 a 4.28%) deseados desde el inicio hasta el final del proceso de la digestión y codigestión de la lechuga de agua. Según Moncayo, (2008) menciona que experimentalmente se ha demostrado que



una carga en digestores semi continuos no debe tener más de un 8 a 12 % de ST, ya que esto ocasionaría un mal funcionamiento en los procesos de biodigestion y digestión. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de ST y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción ST. El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla de sustratos y co-sustratos, con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente.

8.3.5. Sólidos Volátiles (SVT)

La Tabla 18, y la figura 9 muestran los valores de SVT (%) del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 9, los datos obtenidos de SVT (%) tienden a comportarse similarmente al final del proceso, de los tratamientos el T4 fue el más bajo en la etapa inicial a comparación de los demás.

Tabla 18. Valores de SV% promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	66.59	54.73	54.12
T2	LvRum	67.90	60.15	55.57
T3	LvSan	66.98	63.84	61.04
T4	Ls	53.03	55.63	44.76

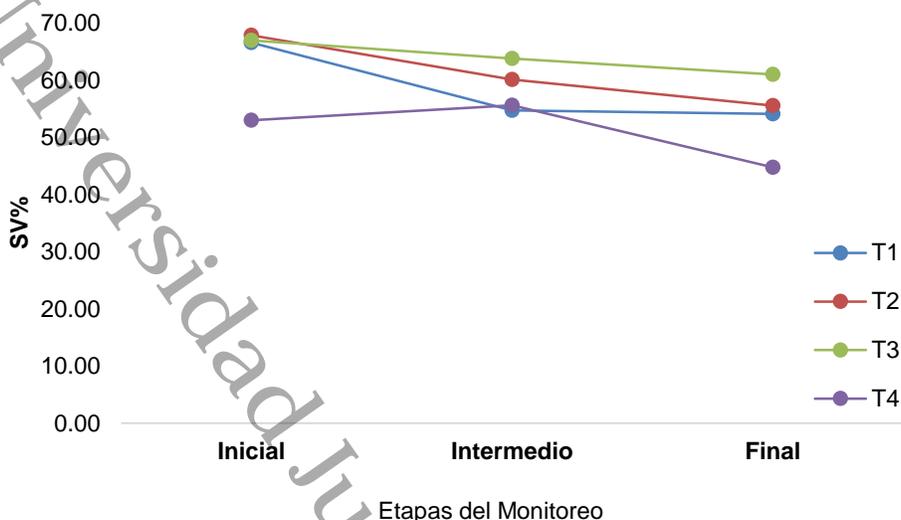


Figura 9. Grafico del comportamiento del ST% de los tratamientos.

Se puede apreciar que en la etapa inicial de la digestión y codigestión de la lechuga de agua, se contaba con rangos de sólidos volátiles de entre 55.03 y 66.59%, y a medida pasaba el tiempo en las etapas de procesos intermedio y final, fueron disminuyendo, esto indica según Moncayo-Romero, (2008) que los SVT se convierten a biogás por el proceso de digestión y codigestión. Varnero y Montero (2015), indican que los SVT contienen componentes orgánicos que teóricamente deben ser convertidos a metano. Así mismo ICAITI (1983), menciona que, los SVT están inmersos en los ST, y estos son degradados para producir biogás durante la digestión anaeróbica.

8.3.6. Cenizas

La Tabla 19, y la figura 10 muestran los valores de Cenizas (%) del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 10, los datos obtenidos de Cenizas (%) tienden a comportarse similarmente al final del proceso, de los tratamientos, el T4 fue el más alto en la etapa inicial y final a comparación de los demás.



Tabla 19. Valores de Cenizas % promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	33.41	45.27	45.88
T2	LvRum	32.10	39.85	44.43
T3	LvSan	33.02	36.16	38.96
T4	Ls	46.97	44.37	55.24

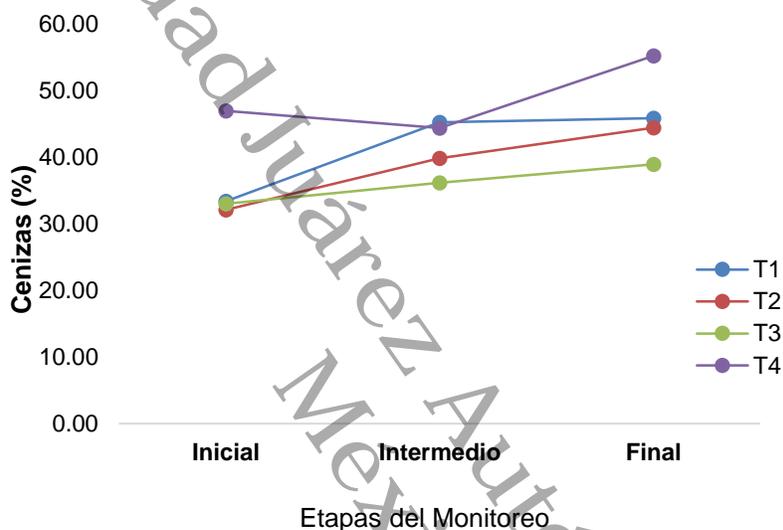


Figura 10. Grafico del comportamiento de Cenizas % de los tratamientos.

8.3.7. Carbono Organico Total

La Tabla 20, y la figura 10 muestran los valores de COT del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 10, los datos obtenidos de COT tienden a comportarse similarmente al final del proceso, de los tratamientos el T4 fue el más bajo en la etapa inicial y alto en la final a comparación de los demás.



Tabla 20. Valores de COT (%) promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	38.62	31.74	31.39
T2	LvRum	39.39	34.89	32.24
T3	LvSan	38.85	37.03	35.41
T4	Ls	30.76	32.27	25.97

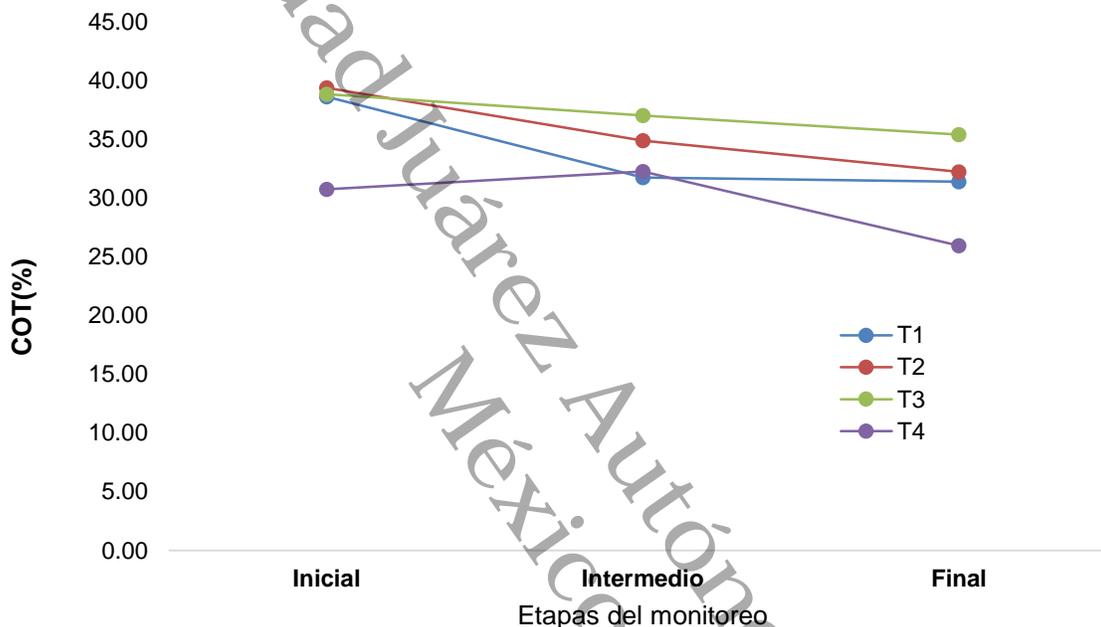


Figura 11. Grafico del comportamiento del COT de los tratamientos.

8.3.8. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Tabla 21, y la figura 12 muestran los valores de DQO del monitoreo en la etapa inicial, intermedio y final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 12, los datos obtenidos de DQO muestra un comportamiento similar en todos tratamientos al inicio de las etapas, pero al final los tratamientos T2 y T4 son similares, a diferencia de T1 y T3 muestran un comportamiento diferente. El tratamiento T3 indica la DQO mas alta en de todos los tratamientos.



Tabla 21. Valores de DQO(ml/l) promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	Inicial	Intermedio	Final
T1	Lv	380.00	220.00	220.00
T2	LvRum	410.00	410.00	410.00
T3	LvSan	400.00	570.00	570.00
T4	Ls	330.00	390.00	390.00

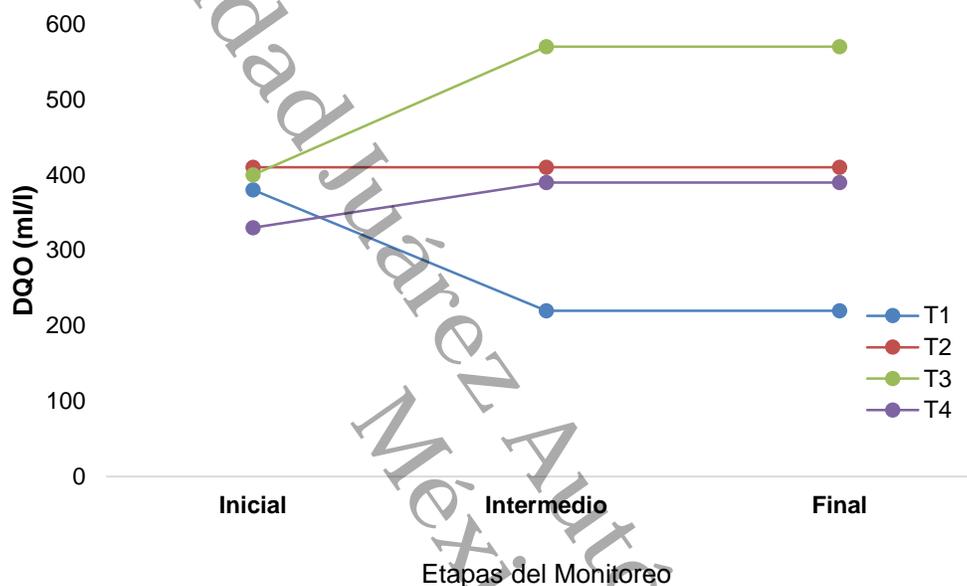


Figura 12. Grafico del comportamiento de la DQO de los tratamientos.

Se puede apreciar que en la etapa inicial de la digestión y codigestión de la lechuga de agua, se contaba con rangos de DQO de entre 330 y 410 mg/L, y a medida pasaba el tiempo en las etapas de procesos intermedio y final, fueron significativamente aumentando, esto indica que la materia orgánica (SV, STV) contenida en los sólidos sufrieron un proceso de degradación, para su conversión a biogás. Varnero y Montero (2015), indican que los SVT contienen componentes orgánicos que teóricamente deben ser convertidos a metano y hay mucha más materia orgánica disponible para su transformación a producto.



8.3.9. Nutrientes N, P y K al final del proceso.

8.3.10. Nitrogeno (%)

La Tabla 22, y la figura 13 muestran los valores de Nitrogeno del monitoreo en la etapa final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 13, los datos obtenidos de nitrogeno muestra un comportamiento ligeramente diferente en todos tratamientos y sus replicas correspondientes, T3 y T4 son similares, a diferencia de T1 y T2 muestran un comportamiento ligeramente diferente y de menor proporción de nitrógeno. El tratamiento T3 indica el % nitrógeno mas alta en de todos los tratamientos.

Tabla 22. Valores promedio de Nitrógeno (%) por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	R1	R2	R3
T1	Lv	2.4	2.6	2.3
T2	LvRum	2.2	2.1	2.1
T3	LvSan	3.9	3.3	3.4
T4	Ls	2.6	2.6	2.6

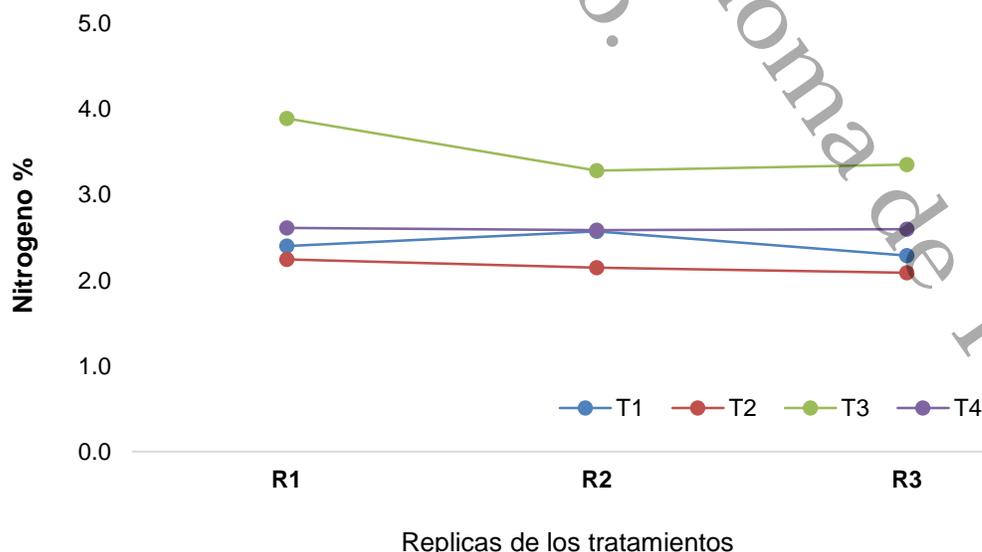


Figura 13. Grafico del comportamiento del Nitrógeno de los tratamientos



Los resultados obtenidos, concuerda con lo reportado por Durán y Henríquez (2007), quienes reportan un valor de 1.8% en un vermicompost derivado de estiércol; asimismo, Restrepo *et al.*, (2010) reportan un valor de 1.77% de N total en un vermicompost derivado de rumen de bovino. Así mismo Hernández *et al.*, (2010), obtuvieron % de NT de 1.6%, en un vermicompost utilizado para la producción de lechuga.

8.3.11. Fosforo (%)

La Tabla 23, y la figura 14 muestran los valores de Fosforo del monitoreo en la etapa final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en las etapas. En la figura 14, los datos obtenidos de Fosforo muestra un comportamiento similar en todos tratamientos al final las etapas, teniendo una diferencia significativa en T1 y T4 con valores similares, a diferencia de T2 y T3 muestran un comportamiento diferente pero con mayor proporción del fosforo.

Tabla 23. Valores de Fosforo promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	R1	R2	R3
T1	Lv	0.55	0.70	0.58
T2	LvRum	0.51	0.66	0.49
T3	LvSan	0.70	0.63	0.63
T4	Ls	0.82	0.73	0.81

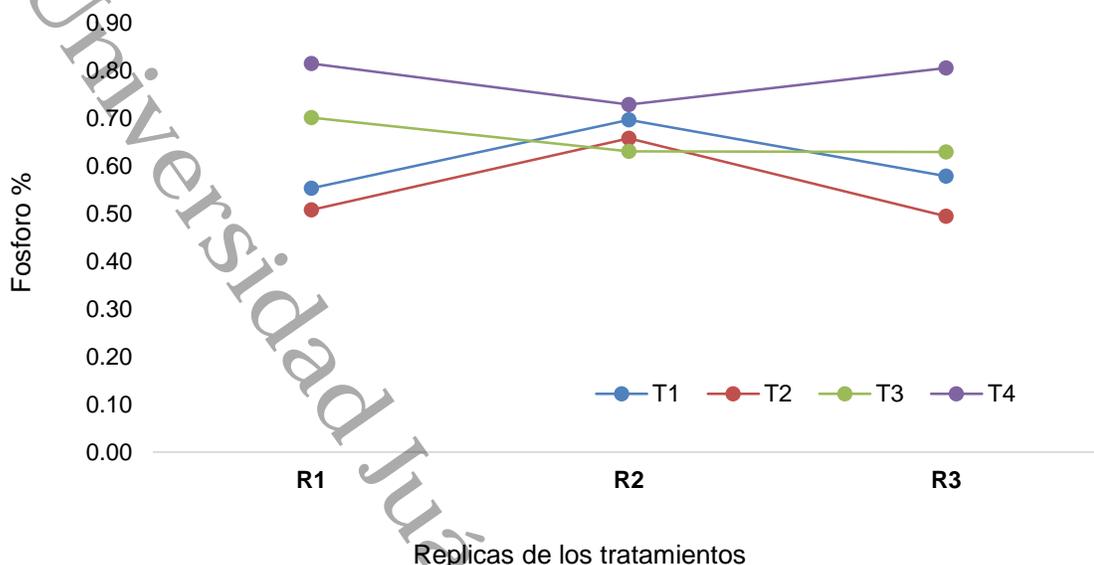


Figura 14. Grafico del comportamiento del Fosforo de los tratamientos.

El tratamiento T2 indica el Fosforo mas alta en de todos los tratamientos de vermicompost de rumen. Los valores de fosforo mas altos se encontraron en la codigestion (T3) y digestion (T4) de la lechuga de aguas. Los valores mas bajos de fosforo lo preentaron los tratamientos T1 y T2. El Fosforo juega un papel vital en la síntesis de carbohidratos y de proteínas, y por ende en la estructura de la planta. Los resultados obtenidos de fosforo de este estudio (de 0.55 a 0.82) son similares a los encontrados por Márquez *et al.* (2008), que alcanzo un registro de 0.43 % de fosforo en los procesos.

8.3.12. Potasio (%)

La Tabla 24., y la figura 15 muestran los valores de Potasio del monitoreo en la etapa final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento en la etapa final del proceso. En la figura 15, los datos obtenidos de potasio muestra un comportamiento diferente para todos los tratamientos al final de las etapas, pero al final los tratamientos T2 y T3 son similares, a diferencia de T1 y T4 que muestran un comportamiento diferente.



Tabla 24. Valores de Potasio promedio por tratamiento durante el monitoreo.

Tratamientos	Sustrato	R1	R2	R3
T1	Lv	6.22	5.72	5.36
T2	LvRum	6.48	6.78	6.2
T3	LvSan	6.28	6.96	6.78
T4	Ls	14.08	13.98	10.34

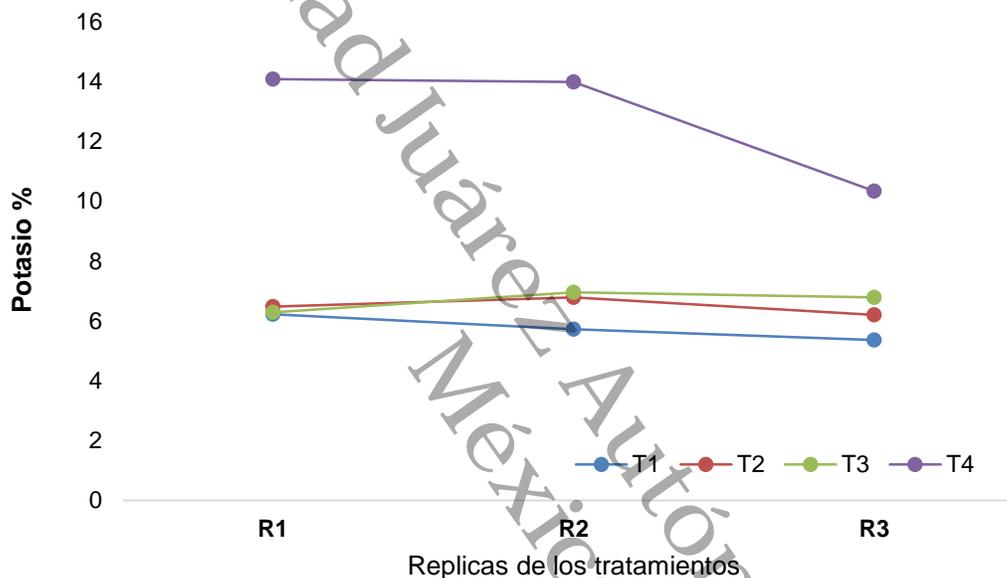


Figura 15. Grafico del comportamiento del Potasio de los tratamientos.

El potasio mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y de salinidad. El tratamiento T4 presento los mejores promedios (10.34 a 14.08%) de potasión. En cuanto a los demás tratamientos (T1, T2 y T4) (de 6.96 a 3.36%) presentaron los promedios más bajos. Los resultados encontrados de potasio en este estudio difieren a los reportados por Duran y Enrique, que tan solo encontró % de 1.27 en los procesos de vermicompost de rumen. La diferencia encontrada entre el % potasio en ambos trabajos se debe quizás, a que la composición y concentración de nutrimentos están en función del origen del sustrato utilizado. Aunado a que el proceso fue diferente. Pero los resultados antes mencionados demuestran que la lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*) en DA y codigestión anaerobia es óptimo para su aprovechamiento nutricional como abono organico y Biol : (líquida y sólida) (FAO, 2011). Schnürer y Jarvis (2010) lo definen Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



como el residuo producto de la degradación de la materia en el proceso de la digestión anaerobia, cual puede ser utilizado como fertilizante, debido que solo una parte del carbono disponible en la materia orgánica se degrada, haciéndolo más fácil de absorber, mientras que el resto de nutrientes se conservan (FNR, 2010).

8.3.13. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier para Biogás (FTIR).

En la figura 15, se muestran los espectros de infrarrojo del biogás en la etapa final de los tratamientos. En el figura se puede observar el mismo comportamiento para todos los tratamientos, se observa la presencia de dos bandas estrechas del **CH₄**, una correspondiente a una señal IR activa a 3019 cm⁻¹ asignado a un estiramiento (triplemente degenerado) y otra correspondiente a una señal IR activa a 1306 cm⁻¹ asignado a una deformación (triplemente degenerada). Junto a estas bandas se encuentran dos grupos de señales muy finas entre 2800 a 3200 cm⁻¹ a estas corresponden las vibraciones asignadas al **NH₃**, así también podemos observar otras dos bandas correspondiente a una señal IR activa a 1391 cm⁻¹ asignada a un estiramiento asimétrico (doblemente degenerado) del **NH₃**. Otras bandas observadas en los espectros son las correspondientes al IR activo del **CO₂** a 2349 cm⁻¹, asignadas al estiramiento asimétrico, y las señales IR activas mostradas a 667 cm⁻¹ asignadas a deformación fuera del plano y deformación en el plano a la misma frecuencia. Se observa también en los espectros dos bandas dobles en la región de 3550 a 3750 cm⁻¹ correspondientes a alcoholes primarios **-CH₂OH** y alcoholes secundarios **=CHOH** (Stine, 1975; Stuart s/f y Housecroft, 2008).

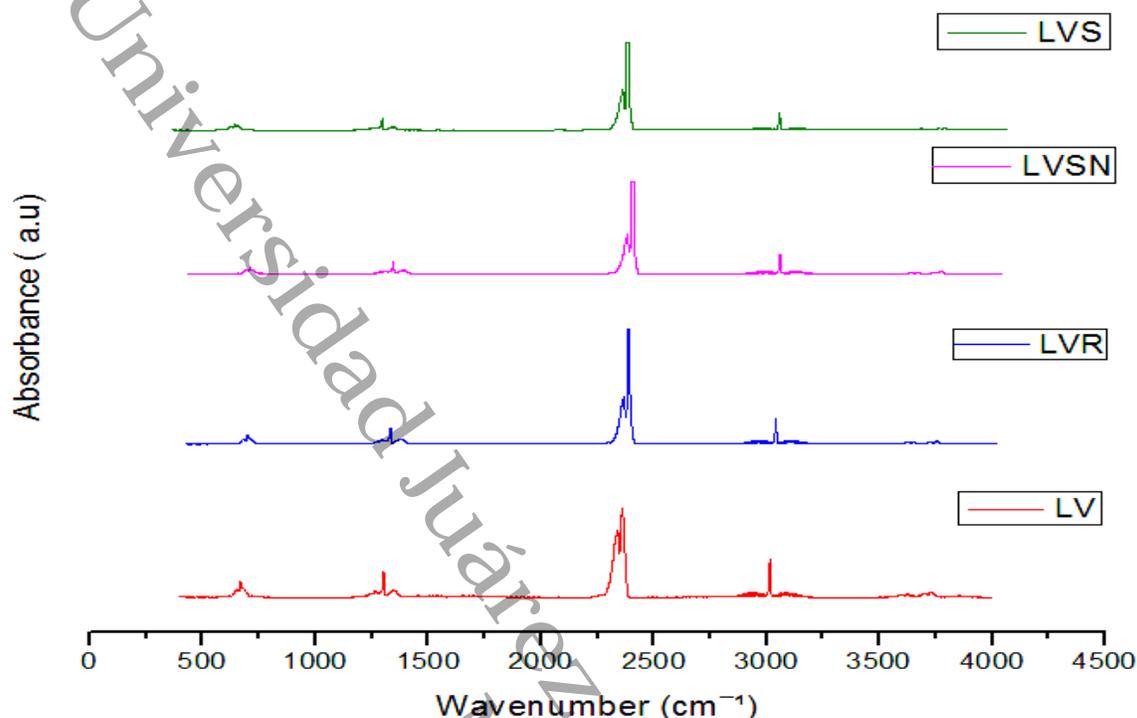


Figura 16. Gráfico de la absorbancia del biogás por tratamiento en FTIR.

8.3.14. OPTIMA BIOGAS 7

La Tabla 25, y la figura 16 muestran los porcentajes de gases del monitoreo en la etapa final de los tratamientos. En la tabla se observa solo datos en promedio de cada tratamiento. En la figura 16, los porcentajes de gases de CO₂, H₂S, O₂ muestran un comportamiento similar en todos tratamientos, el CH₄ fue el mas alto de todos los gases. El tratamiento T2 indica el mayor porcentaje de CH₄ en todos los tratamientos.

Tabla 25. Porcentaje de gases por tratamientos con el equipo Optima Biogas 7.

Tratamientos	Sustrato	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (Ppm)	O ₂ (%)
T1	Lv	53.41	26.74	53.575	3.65
T2	LvRum	73.09	22.25	28.05	3.50
T3	LvSan	65.85	24.64	9.85	5.90
T4	Ls	56.28	11.95	6.65	9.00

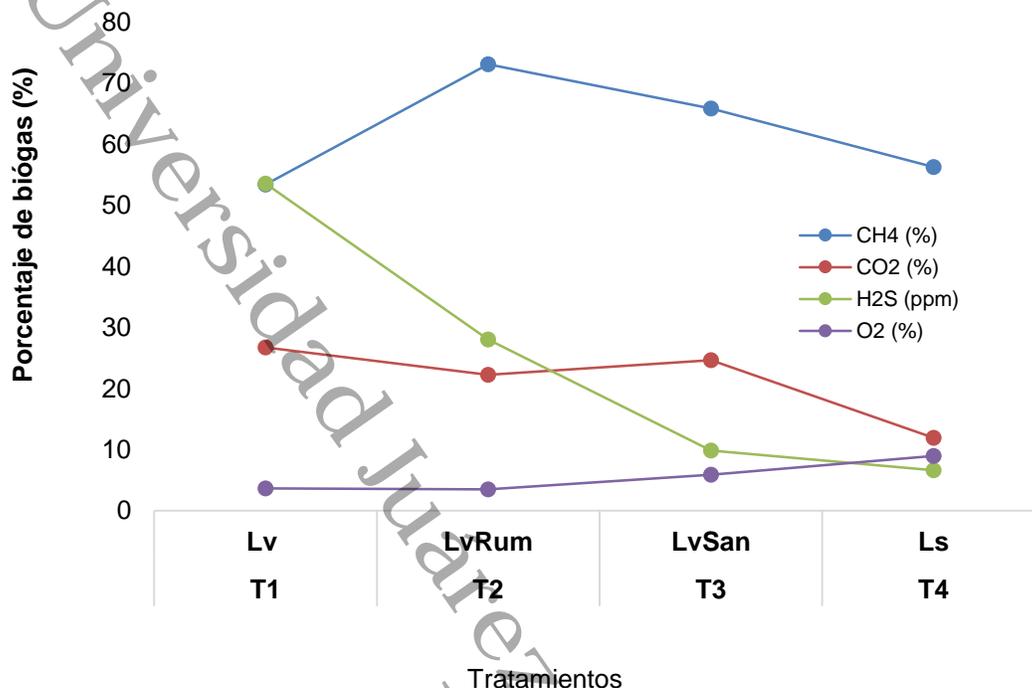


Figura 17. Grafica del comportamiento de los gases por tratamiento.

Se puede observar que la codigestión (T2 y T3) tuvieron mayores rendimientos en la producción de metano, Pantawong *et al.* (2015) reporta que la codigestión de lechuga de agua es viable en la producción de metano, reportando valores de producción de biogás de 9667.33 mL, del cual el 66.35% correspondió a metano. Con base a estos resultados, la lechuga de agua se presenta como un sustrato con potencial para la producción de biogás mediante DA y codigestión anaerobia ya que se obtuvieron valores de producción más altos (Tablas 25).

Aunque solo T2 y T3 alcanzaron porcentajes más altos que Pantawong *et al.* (2015), se obtuvo eficientemente cifras mayores reportadas en este mismo trabajo con el calculo teorico para la evaluacion de la produccion de biogas dado por Tchobanoglous *et al.* (1998) reportando un 41.27% de CH₄.

8.3.15. Analizador de gas de combustión OPTIMA BIOGAS 7

La Figura 17, muestra el analizador de gas de combustión que se utilizó para la medición de la producción real de biogás se utilizó un analizador portátil OPTIMA



BIOGAS 7®, el cual mide simultáneamente los niveles de CH₄ (%), H₂S (ppm), CO₂ (%) y O₂ (%) y presión hasta 300 HP.



Figura 18.- Analizador de gas de Combustión OPTIMA BIOGAS 7.

8.3.16. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier para Nutrientes (FTIR).

En la figura 18, muestra los espectros de infrarrojo de los extractos residuales de los tratamientos de digestión y codigestión anaerobia en la etapa final de los tratamientos. En la que se puede observar un comportamiento similar en las diferentes bandas de absorción. Las principales señales de estos espectros son: entre 3400 cm⁻¹ y 3600 cm⁻¹, debido a vibraciones de grupos OH alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos, vibraciones de alargamiento de enlaces N-H asociadas a amidas; La banda alrededor de 2920 cm⁻¹ debido vibraciones de alargamiento de enlaces C-H de estructuras alifáticas; la banda alrededor de 2850 cm⁻¹, asociados a vibraciones de alargamiento simétrico de grupos CH₂ de ácidos grasos y alquenos; la banda alrededor de 2350 cm⁻¹ asociado a CO₂; la banda entre 1620 cm⁻¹ y 1650 cm⁻¹ asociado a vibración de alargamiento de enlaces C=O en amidas primarias, vibración de alargamiento de enlaces C=O en ácidos carboxílicos y/o quinonas y vibraciones de alargamiento de enlaces C=C anillos aromáticos; la banda entre 1450 cm⁻¹ y 1460 cm⁻¹ asociados a vibraciones de alargamiento de enlaces C-H en estructuras alifáticas; una clara señal en 1030 cm⁻¹ de vibraciones



de alargamiento de enlaces C-O de polisacáridos (Abouelwafa et al., 2008; Droussi et al. 2008; Smidth et al., 2008); La banda entre 910 cm^{-1} de acuerdo a Gutiérrez et al, 2005, correspondería a uniones β de los anillos de glucosa asociados con el esqueleto aromático de la lignina. Y por último a banda entre los 470 cm^{-1} y 540 cm^{-1} la corresponde a componentes minerales que se liberan producto de la mineralización de la materia orgánica.

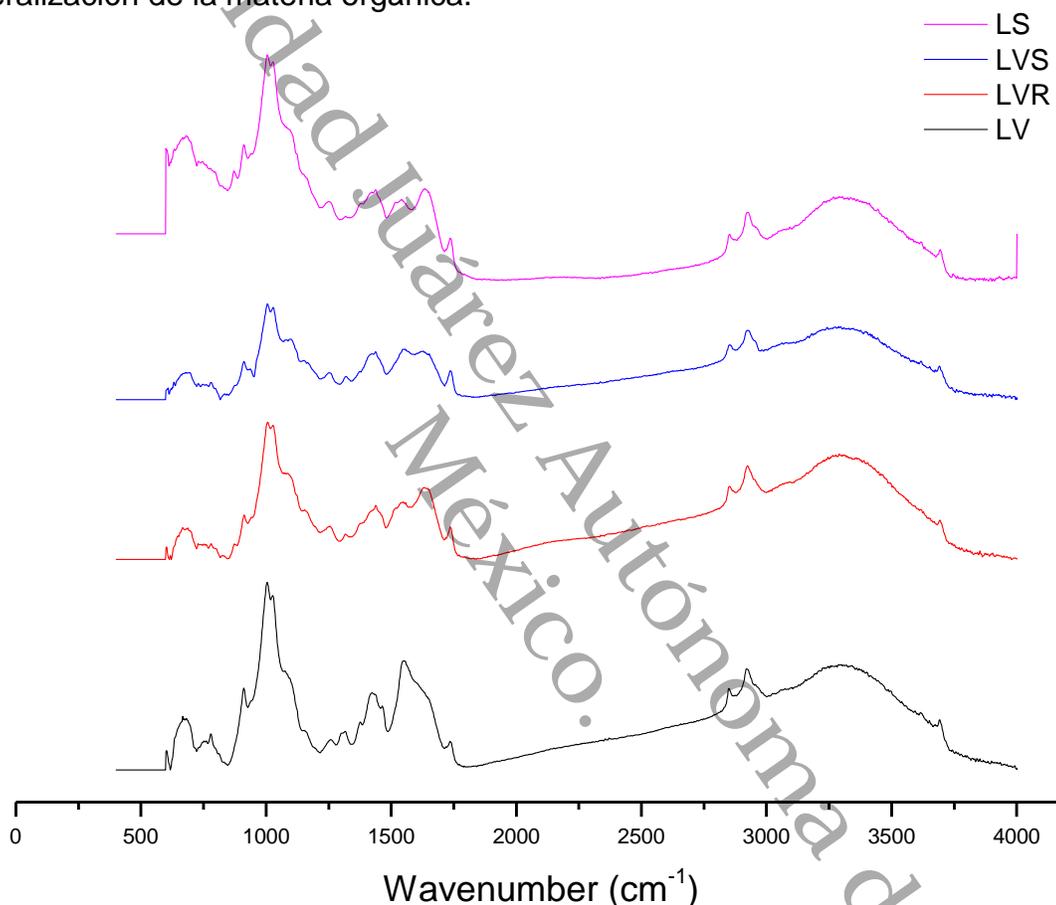


Figura 19. Gráfico de la absorbancia de Nutrientes por tratamiento en FTIR.

8.3.17. Análisis Estadístico

8.3.17.1. Sólidos Totales (%)

El análisis de Kruskal Wallis no indicó diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre las medianas L_s de la variable sólidos totales (%) de los diferentes tratamientos evaluados (L_v , $L_v\text{Rum}$, $L_v\text{San}$ y L_s) con un 95% de confiabilidad.



8.3.17.2. Sólidos Volátiles Totales (%)

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable sólidos volátiles totales (%) de los diferentes tratamientos evaluados (*Lv*, *LvRum*, *LvSan*, *Ls*) con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras diferentes tratamientos desiguales. Los resultados muestran que el tratamiento Lech-San presenta el % medio más alto de sólidos volátiles totales con un promedio de 61.04 ± 1.48 , seguido por los tratamientos *LvRum* y *Lv* con promedios con 55.57 ± 3.04 , 54.12 ± 1.24 respectivamente. El tratamiento que mostro el % promedio más bajo de SV fue el tratamiento con un promedio de 44.76 ± 1.75 (Figura 2).

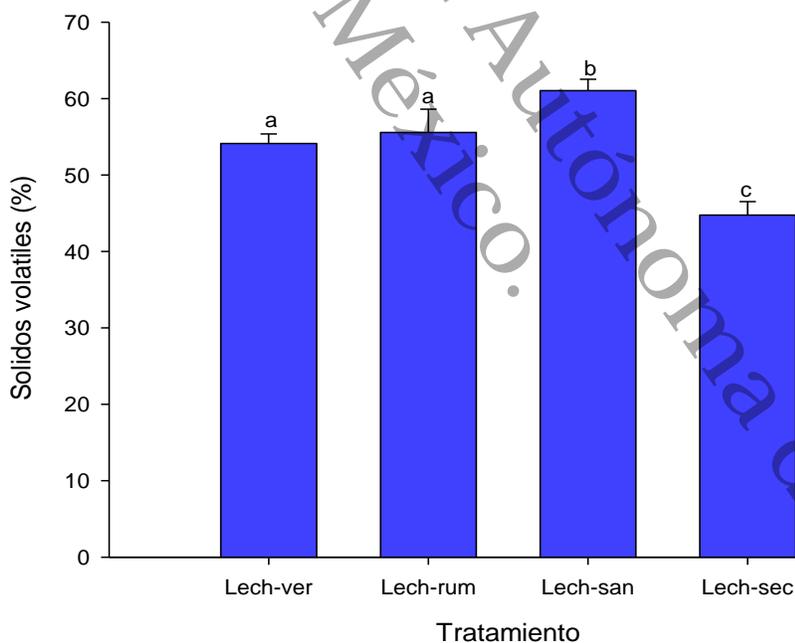


Figura 20. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de Sólidos Volátiles.



8.3.17.3. Cenizas (%)

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable ceniza (%) de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras iguales tratamientos iguales. Los resultados muestran que el tratamiento Lech-Sec presenta el % medio más alto de solidos volátiles totales con un promedio de 55.23 ± 1.75 , seguido por los tratamientos Lech-H y Lech-Rum con promedios con 45.87 ± 1.24 , 44.43 ± 3.04 respectivamente. El tratamiento que mostro el % promedio más bajo de ceniza fue el tratamiento Lech-San con un promedio de 38.95 ± 1.48 (Figura 3).

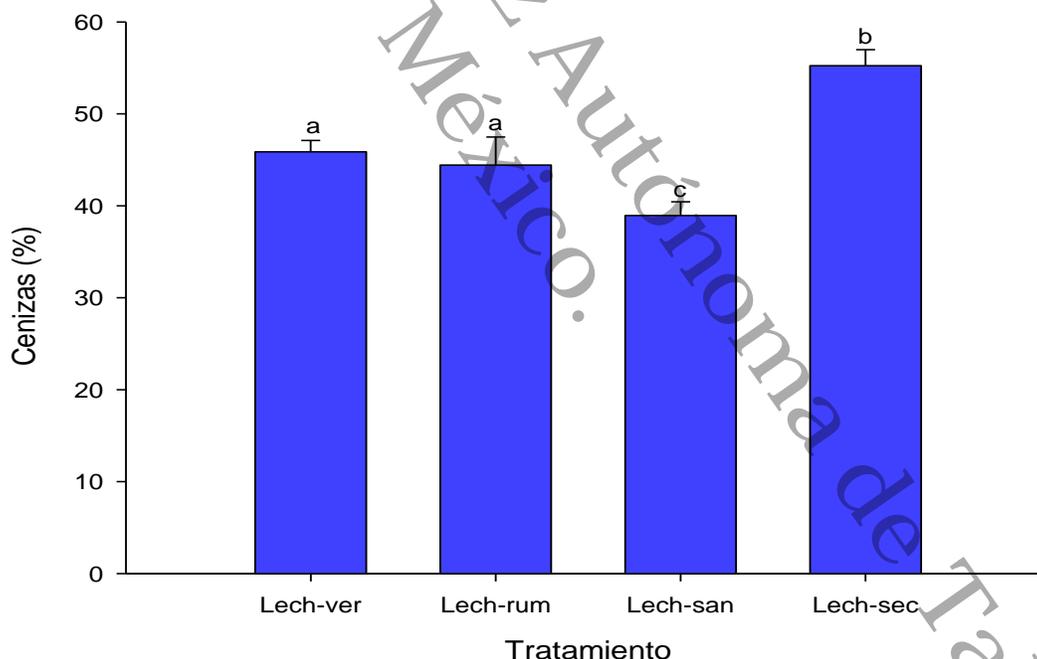


Figura 21. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de % Ceniza.



8.3.17.4. DQO (%)

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas significativas ($P = 0.045$) entre los promedios de la variable DQO (mg/L) de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras diferentes tratamientos diferentes. Los resultados muestran que el tratamiento Lech-San presenta el % medio más alto de DQO con un promedio de 570 ± 108.16 , seguido por los tratamientos Lech-Rum y Lech-Sec con promedios con 410 ± 45.82 , 390 ± 187.35 respectivamente. El tratamiento que mostro el % promedio más bajo de DQO fue el tratamiento Lech-H con un promedio de 220 ± 96.43 (Figura 4).

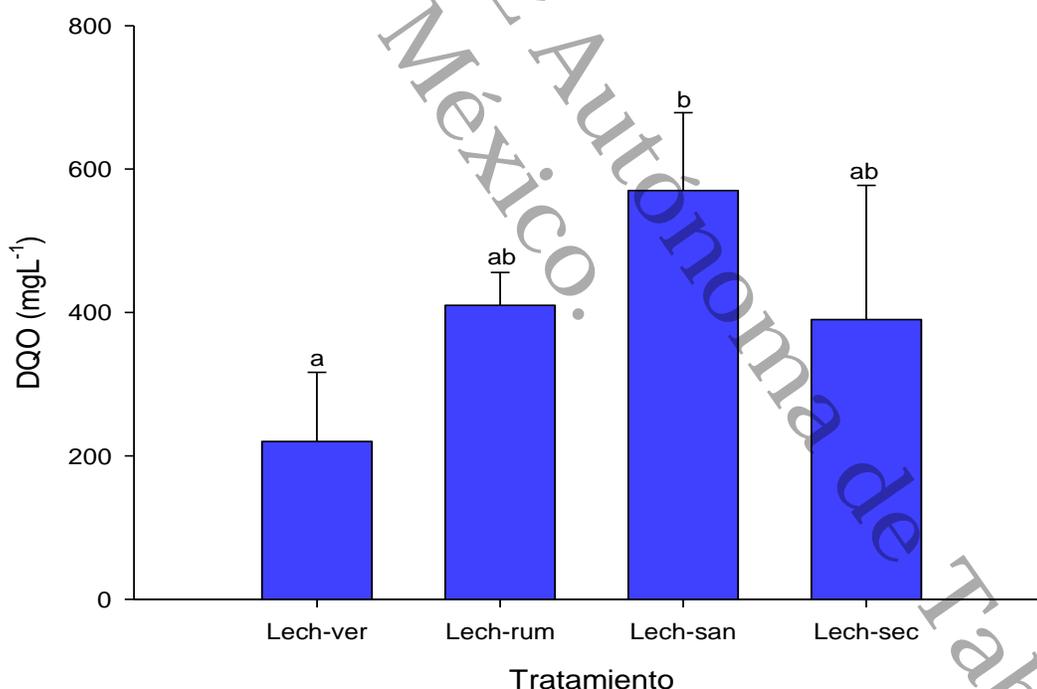


Figura 22. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de DQO.



8.3.17.5. pH

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) entre los promedios de la variable pH de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras iguales tratamientos iguales. Los resultados muestran que los tratamientos Lech-Sec, Lech-San y Lech-Rum presentan los promedios más alto de pH con un promedio de 6.82 ± 0.55 , 6.74 ± 0.06 , 6.72 ± 0.06 . El tratamiento que mostro el pH promedio más bajo de pH fue el tratamiento Lech-H con un promedio de 6.47 ± 0.11 (Figura 5).

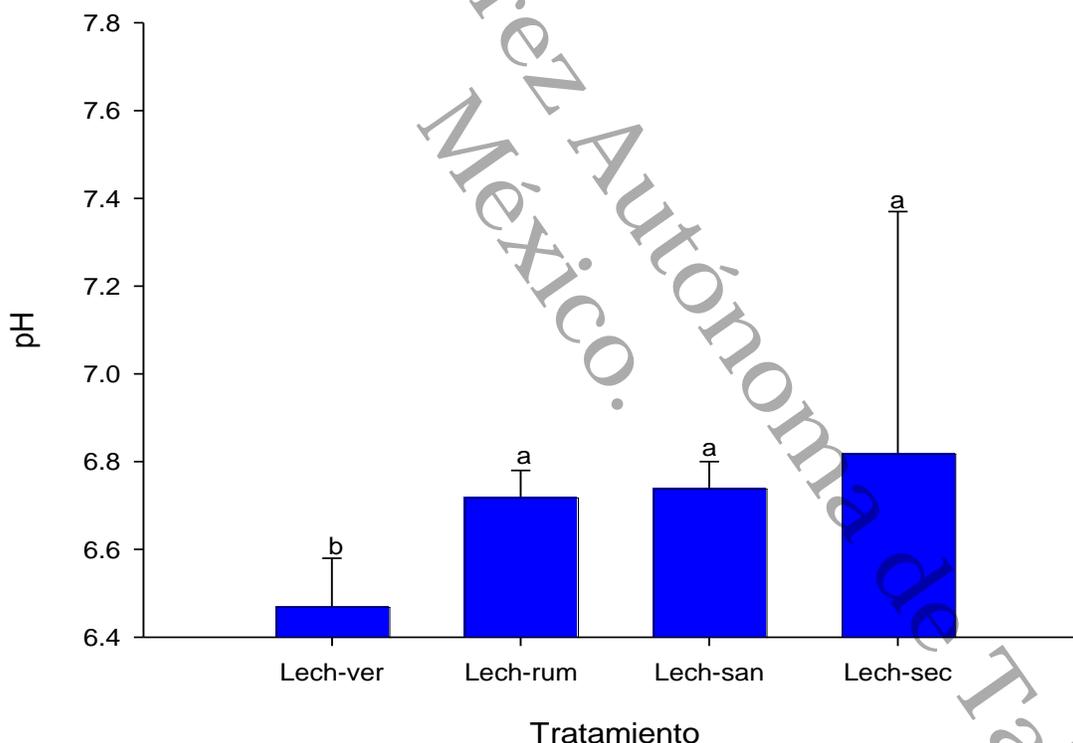


Figura 23. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de pH.



8.3.17.6. CE

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) entre los promedios de la variable CE (mg/L) de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras iguales tratamientos iguales. Los resultados muestran que los tratamientos Lech-San y Lech-Sec presentan los promedios más altos de CE con un promedio de 13.46 ± 1.35 , 12.69 ± 0.08 . Los tratamientos Lechuga y Lech-Rum presentaron los valores promedios más bajos de CE con 9.98 ± 0.61 , 10.07 ± 0.59 respectivamente (Figura 6).

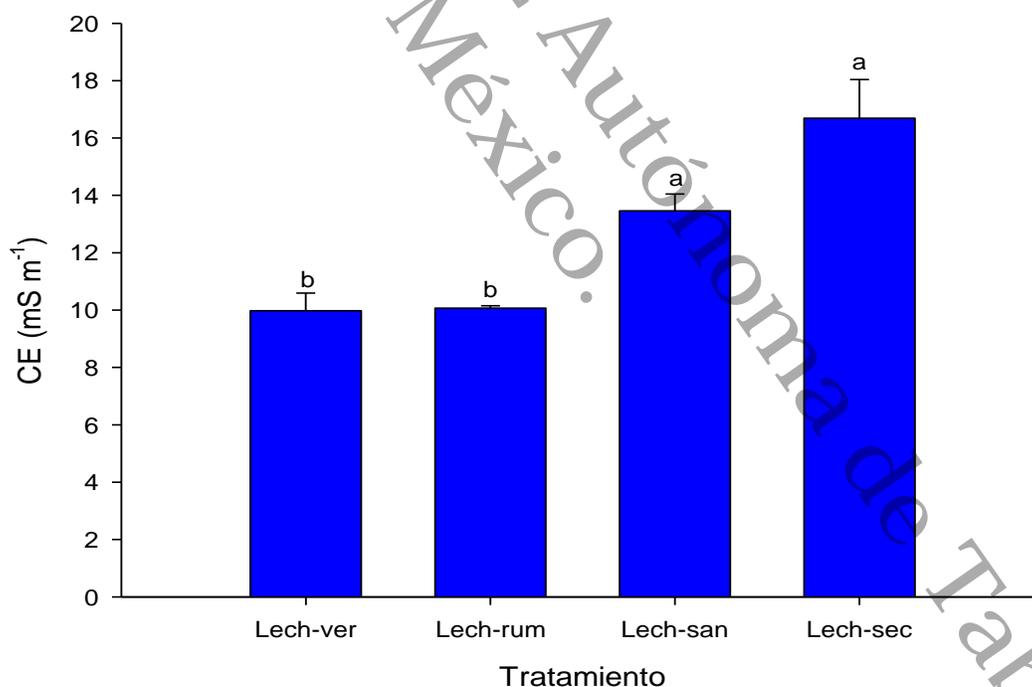


Figura 24. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de CE.



8.3.17.7. Temperatura

El análisis de Kruskal Wallis no indico diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre las medianas de la variable temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad.

8.3.17.8. COT

El análisis de varianza de un factor mostro diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable COT de los diferentes tratamientos evaluados con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey indico diferencias significativas entre las medias de los diferentes niveles, indicando letras diferentes tratamientos diferentes. Los resultados indican que el tratamiento Lech-San presenta el COT promedio más alto de COT con un promedio de 35.40 ± 0.86 , seguido por los tratamientos Lech-Rum y lechuga con promedios de 32.23 ± 1.76 , 31.39 ± 0.71 respectivamente. El tratamiento que mostro el promedio más bajo de COT fue el tratamiento Lech-Sec con un promedio de 25.96 ± 1.01 (Figura 7).

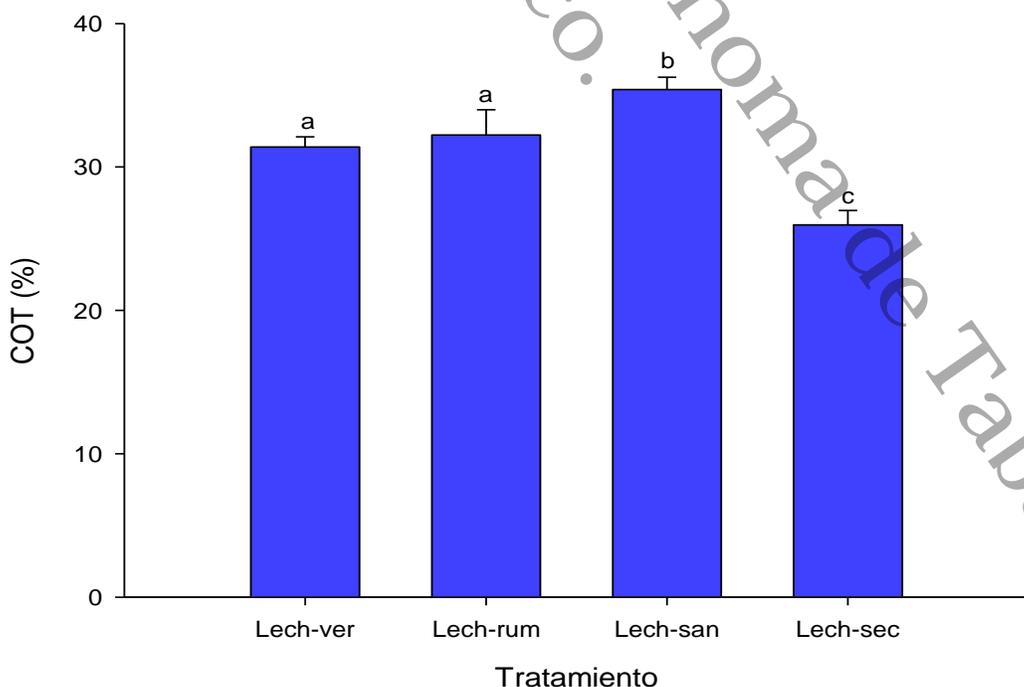


Figura 25. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de COT.



8.3.17.9. Nitrógeno (%)

El análisis de Kruskal Wallis indico diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) entre las medianas de la variable nitrógeno (%) de los diferentes tratamientos evaluados (*Lv*, *LvRum*, *LvSan* y *Ls*) con un 95% de confiabilidad. El contraste de medianas de Mann Whiney mostro diferencias significativas entre un nivel y otro, indicándose con letras iguales tratamientos iguales. Se puede observar que el tratamiento *LvSan* muestra el % más alto de nitrógeno con una mediana de $3.35 \pm Q 3.28, Q 3.89$, seguida por los tratamientos *Ls* y *Lv* con $2.6 \pm Q 2.59, Q 2.61$, $2.4 \pm Q 2.29, Q 2.57$ respectivamente. El tratamiento que indico el valor más bajo de nitrógeno fue el Lech-Rum con una mediana de $2.15 \pm Q 2.09, Q 2.25$

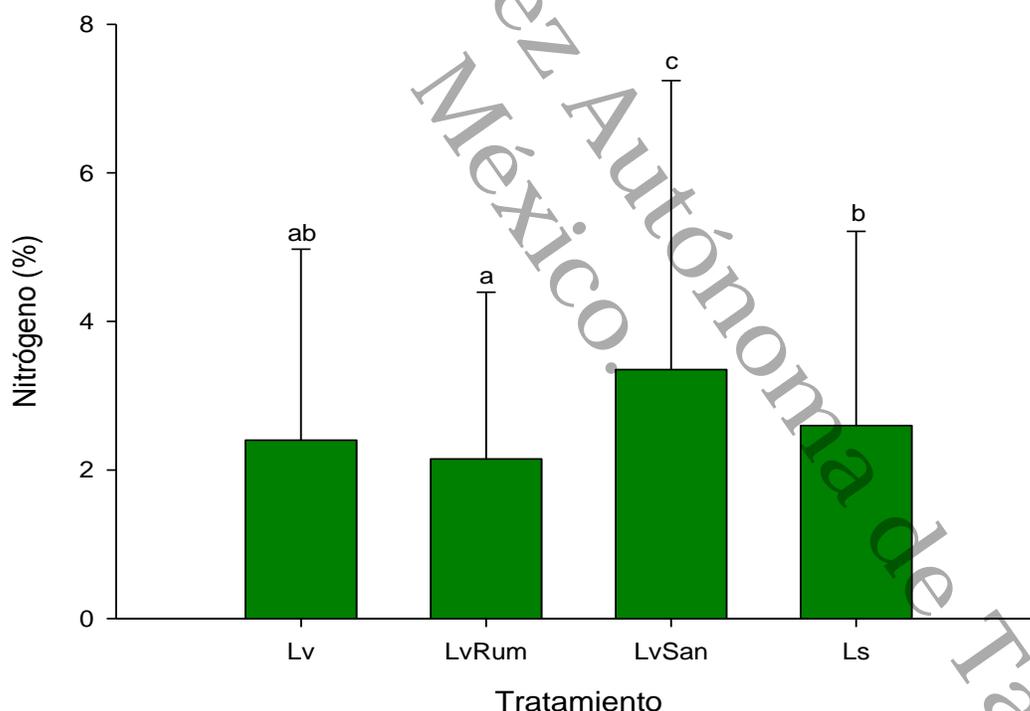


Figura 9. Grafico del análisis de Varianza de Kruskal Wallis de Nitrógeno.



8.3.17.10. Potasio (%)

El análisis de varianza indico diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) entre las medias de la variable potasio (%) de los diferentes tratamientos evaluados (*Lv*, *LvRum*, *LvSan* y *Ls*) con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey mostro diferencias significativas entre un nivel y otro, indicándose con letras iguales tratamientos iguales. Se puede observar que el tratamiento *Ls* muestra el % promedio más alto de potasio con una media de $12.80 \pm DE 2.13$. Los % promedios más bajos de potasio se encontraron en los tratamientos *Lv*, *Lvr*, *Lvsan*, con una media $5.77 \pm DE 0.43$, $6.49 \pm DE 0.29$ y $6.67 \pm DE 0.35$.

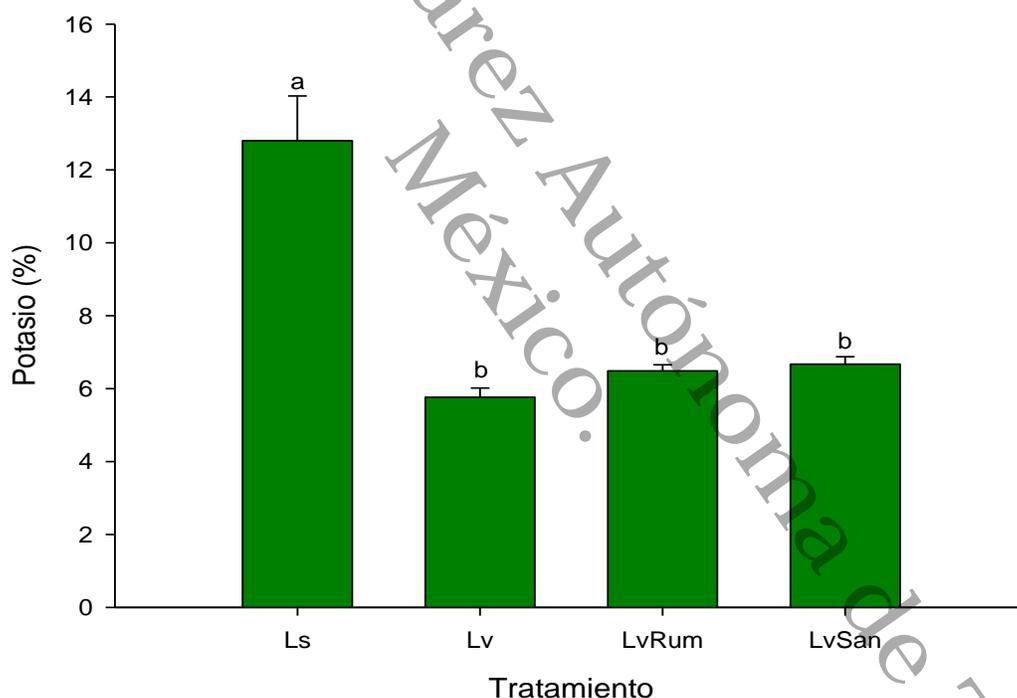


Figura 27. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de Potasio.



8.3.17.11. Fosforo (%)

El análisis de varianza indico diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) entre las medias de la variable potasio (%) de los diferentes tratamientos evaluados (*Lv*, *LvRum*, *LvSan* y *Ls*) con un 95% de confiabilidad. El contraste de medias de Tukey mostro diferencias significativas entre un nivel y otro, indicándose con letras iguales tratamientos iguales. Se puede observar que el tratamiento *Ls* muestra el % promedio más alto de potasio con una media de $0.78 \pm DE 0.05$. Los % promedios más bajos de potasio se encontraron en los tratamientos *Lv*, *Lvr*, *Lvsan*, con una media $0.61 \pm DE 0.08$, $0.55 \pm DE 0.09$ y $0.65 \pm DE 0.04$.

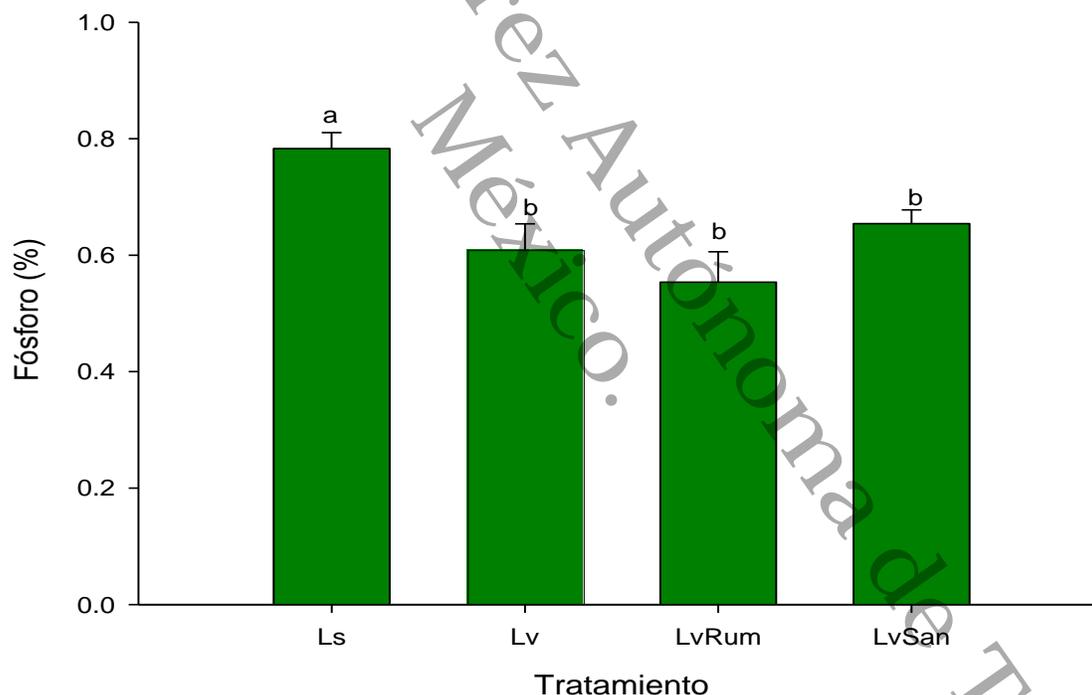


Figura 28. Grafico del análisis de Varianza de medias de Tukey de Fosforo.



IX. CONCLUSIÓN

Se encontró que los tratamientos de codigestión T2 (LvRum) y T3 (LvSan) presentaron los mejores resultados en cuanto a la cantidad generada de biogás por sus altos contenidos de CH₄. Con respecto al resto de los tratamientos, superaron satisfactoriamente el cálculo teórico de biogás al tener un porcentaje mayor al estimado. En cuanto a la remoción de la DQO se encontró que únicamente el tratamiento T1 (Lv), redujo este parámetro, del tiempo inicial al intermedio, manteniéndose constante hacia el final del experimento. Para el resto de los tratamientos la DQO se mantuvo prácticamente constante para T2 y T4, para el T3 se dio un incremento de la DQO de la etapa inicial a la intermedia.

Los nutrientes evaluados en el producto residual de la digestión anaerobia y codigestión se encontraron dentro del rango óptimo, establecido por la NMX-FF109-SCFI-2008a, por lo que considera adecuado para su uso por su contribución nutricional que puede aportar a las plantas.

Con base a los resultados obtenidos en este trabajo se propone a la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) como materia prima para la producción de biogás con un potencial alto mediante el proceso de digestión anaerobia y codigestión, lo que permite abrir un campo en el control, manejo y aprovechamiento de este residuo en la UMA de la División académica de Ciencias Biológicas (DACBio) en el estado de Tabasco, para aprovechar en el proceso otros residuos que se generan y que causan problemas ambientales en suelo, aire y agua principalmente.



X. LITERATURA CITADA

Abbasi SA, Nipanay PC, Panholzer MB. (1991). Biogas production from the aquatic weed *Pistia* (*Pistia stratiotes*). *Bioresour Technol* 1991;37:211–4. doi:10.1016/0960-8524(91)90185-M.

Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3228–3242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>

Ageyman F., Tao W. (2014). Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, 133, pp. 268-274.

AGROWASTE. (2013). Digestión Anaerobia. 26 de marzo 2017, de Centro Tecnológico Nacional de la conservación y Alimentación (CTC), Consejo Superior de Investigaciones científicas (CSIC) Sitio web: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>

Alkalay, D. (1996). Estudio de caso sobre la problemática nacional enfrentada para avanzar en la utilización energética de los residuos municipales en Chile. Retrieved March 13, 2018, from <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0b.htm>

Bibing, (2017). La digestión anaerobia. Estudiot técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. Sitio web: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70603/fichero/3.+la+digestion+anaerobia.pdf>



- Bonilla-Barbosa, J., & Santamaría-Araúz, B. (2013). Plantas acuáticas exóticas y traslocadas invasoras. *Plantas Acuáticas Exóticas Y Traslocadas Invasoras*, 223–247. <https://doi.org/10.13140/2.1.2050.8967>
- Botero Botero, Raúl., Preston, T. R. (1987). COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS “ MANUAL PARA SU INSTALACION , OPERACION Y UTILIZACION .” Agriculture.
- Caldera M., Yaxcelys A., Pedro I. Madueño M., Alonso G. Griborio D., Edixon C. Gutiérrez G., y Nola M. Fernández A. (2003). Efecto del Tiempo de Retención Hidráulica en el Funcionamiento de un Reactor UASB tratando Efluentes Cárnicos. *Red de Revistas Científicas de América Latina*. Vol. 3 (1)
- Cervantes, F., Pavlostathis, S. y Van Handel, A. (2006). *Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters*. (1ra. ed.). London, England: IWA.
- Chanda S, Bhaduri SK, Sardar D. (1991). Chemical characterization of pressed fibrous residues of four aquatic weeds. *Aquat Bot*;42:81–5. doi:10.1016/0304-3770(91)90108-H.
- Chen, R., Roos, M. M., Zhong, Y., Marsh, T., Roman, M. B., Hernandez Ascencio, W., ... Liao, W. (2016). Responses of anaerobic microorganisms to different culture conditions and corresponding effects on biogas production and solid digestate quality. *Biomass and Bioenergy*, 85, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.028>
- Coto, J.E., Maldonado, J.J., Botero, R., Murillo, J. V. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de earth. *Earth*, 3, 129–138.
- Croat., T. B., & Carlsen, M. (1997). *Flora Del Bajío Y De Regiones Adyacentes*. Ecologia.Edu.Mx, 1–111. Retrieved from



<http://www1.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/Complementario-XXI.pdf>

Dębowski, M., Zieliński, M., Grala, A., & Dudek, M. (2013). Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies - Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.029>

Diario Oficial de la Federación (DOF). NMX-FF-109-SCFI-2008. Humus de lombriz (lombricomposta). Especificaciones y métodos de prueba. 28 pp.

FIRCO. 2009. Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México.

Food administration organization (FAO) 2011. Manual de biogás. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> febrero 2017

Food administration organization (FAO). 2002. los fertilizantes y su uso. 4ta ed. Roma, Italia

Gerardi, M. (2003). *the microbiology of anaerobic digesters*. New Jersey, EEUU: Wiley interscience.

Gómez, X., Cuetos, M., Cara, J., Morán, A., García, A. (2005) Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. doi: 10.1016/j.renene.2005.09.029

Gusain, R., & Suthar, S. (2017). Potential of aquatic weeds (*Lemna gibba*, *Lemna minor*, *Pistia stratiotes* and *Eichhornia* sp.) in biofuel production. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.030>



- Gutierrez, I., Zuluaga, R., Cruz, J., Gañan, P. (2005). Influencia del tratamiento con vapor sobre la estructura y comportamiento físico-mecánico de fibras de plátano. *Inf. Technol.* Vol.16:15-21.
- Hernández-García, H., Olgúin, E. J., Sánchez-Galván, G., & Monroy-Hermosillo, O. (2015). Production of Volatile Fatty Acids during the Hydrolysis and Acidogenesis of *Pistia stratiotes* Using Ruminal Fluid. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2494-3>
- Housecroft C. E. and Sharpe G. A. (2008). *Inorganic Chemistry*. Second Edition. Edit. Pearson/Prentice Hall., p 101-107
- IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). <https://doi.org/ISBN-13: 978-84-96680-21-0>
- Insam, H., I. H. Franke-Whittle, and M. Goberna. (2010). Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment, p. 1-34. In H. Insam, I. H. Franke-Whittle, and M. Goberna (ed.), *Microbes at work. From wastes to resources*. Springer, Berlin, Germany.
- Kim J, Kang C-M. (2015). Increased anaerobic production of methane by co-digestion of sludge with microalgal biomass and food waste leachate. *Bioresour. Technol.* 189:409- 12
- Liu, X., Wang, W., Shi, Y., Zheng, L. Gao, X., Qiao, W., Zhou, Y. (2012) Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect or organic loading rate. *Waste Management* 32, 2056-2060.
- Moncayo-Romero, G. (2008). *Biodigestores: dimensionamiento y construcción de biodigestores y plantas de biogas (Aqualimpia)*. AquaLimpia Beratende Ingenieure.



- Moreno, J., Moral, R., García J., Pascual, J., y Bernal, M. (2014). DE RESIDUO A RECURSO, El camino hacia la sostenibilidad, uso Agrícola de materiales digeridos: situación actual y perspectivas del futuro. Mundi Prensa, Madrid España, pp. 1-129.
- Morero, B., Gropelli, E., y Campanella, E. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. Ciencia y Tecnología 10, ISEU, pp. 187-201.
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. Biotechnology Reports, 5(1), 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- O'Sullivan, C., Rounsefell, B., Grinham, A., Clarke, W., & Udy, J. (2010). Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). Ecological Engineering, 36(10), 1459–1468. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.027>
- Pantawong R., Chuanchai A., Thipbunrat P., Unpaprom Y., R. R. (2015). Experimental Investigation of Biogas Production from Water Lettuce, *Pistia stratiotes* L. Emer Life Sci Res, 1(2), 41–46. Retrieved from http://www.emergentresearch.org/7.Pantawong et al_ELSR_2015_2.pdf
- Pavlostathis SG, Giraldo-Gomez E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. Water Sci Technol; 24:35–59.
- Rameshprabu, R., Kawaree, R., & Unpaprom, Y. (2015). A newly isolated green alga, *Pediastrum duplex* Meyen, from Thailand with efficient hydrogen production. International Journal of Sustainable and Green Energy International Journal of Sustainable and Green Energy. Special Issue: Renewable Energy Applications in the Agricultural Field and Natural



Resource Technology, 4(1), 7–12.
<https://doi.org/10.11648/j.ijrse.s.2015040101.12>

Rao PV, Baral SS. (2011) Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. Chem Eng J.;172(1- 2):977-86.

Rebuffo Sc, Kirschner C, Staemmler M, Naumann D. (2007). Rapid Species and Differentiation of Non-Tuberculous Mycobacteria by Fourier-Transform Infrared Microspectroscopy. J Microbiol Meth. 68:282-290

Riaño, B., Coca, M., García-González, M.C., (2014). Evaluation of Fenton method and ozone-based processes for colour and organic matter removal from biologically pre-treated swine manure. Chemosphere. 117(0), 193-9.

Riofrio, J. E. (2008). Escuela politécnica del ejército. Universidad Politecnica del Ejercito.

Rodríguez F., H. y J. Rodríguez A. (2002). Métodos de análisis de suelos y plantas. Criterios de interpretación. Trillas. México, D.F.

Sadzawka R., A., Carrasco R., M., Grez Z., R., & Mora G., M. (2005). Métodos de Análisis de Compost. Ministerio de Agricultura.

Sánchez-Galván, G., Mercado, F. J., & Olgúin, E. J. (2013). Leaves and roots of *Pistia stratiotes* as sorbent materials for the removal of crude oil from saline solutions. Water, Air, and Soil Pollution, 224(2).
<https://doi.org/10.1007/s11270-012-1421-0>

Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S, y Janssen, R. 2008. Biogas handbook. Recuperado de:
<http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf> (febrero, 2017).

SEMARNAT. 2010. Especificaciones técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México. SEMARNAT-SAGARPA-FIRCO. 203pp



Smidt, E., Lechner, P., Schawanninger, M., Haberhauer, G., Gerzabek, M.H. 2002. Characterization of waste organic matter by FT-IR spectroscopy: application in waste science. *Appl. Spectrosc.* 56:1170-1175

Smidt, E., Meissl, K. (2007). The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management. *Waste Management.* 27:268-276.

Sosa, J. Laines, J. (2012). Digestores anaerobios: una alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos y producción de biogás. *Kuxulkab' Revista de Divulgación*, XVIII (35) pp.11-15.

Stine K. E. (1975). *Beckman Laboratory Manual*, Appendix.

Stuart B. (s/f). *Infrared Spectroscopy Fundamentals and Applications*. WILEY. Pp 1-70.

Suthar S, Pandey B, Gusain R, Gaur RZ, kumar K. (2017). Nutrient changes and biodynamics of *Eisenia fetida* during vermicomposting of water lettuce (*Pistia* sp.) biomass: a noxious weed of aquatic system. *Environ Sci Pollut Res.* doi:10.1007/s11356-016-7770-2.

Tchobanoglous, G., Darby J., Bourgeois, K., McArdle J., Genest p., Tylla M., (1998). Ultrafiltration as an advanced tertiary treatment process for municipal wastewater, *Desalination*. Volume 119, Issues 1–3. Pages 315-321. ISSN 0011-9164. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00175-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00175-1).

Varnero Moreno. (2015). Melanocortin-4 receptor gene mutations in obese slovak children. *Physiological Research* (Vol. 64). <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>

Varnero, T., (2011). *Manual de biogás Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Global Environment Facility (GEF), Santiago de Chile.*

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



- Vijay, K., Chandra, R., Subbarao, M., y Kapdi, S. (2006). Biogas Purification and bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications. Proceedings of the 2nd Joint International
- Viquez, J. (2010). Remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S (g)) /ácido sulfhídrico (H_2S (aq)) en el biogás. ECAG, 53, pp. 16-21.
- Weber B. (2012). Fundamentos biológicos de la metanogénesis. En cuaderno temático no. 5. Producción de biogás en México. Red Mexicana de Bioenergía A. C. Pp 8-12.
- Wilkie, A. C., & Evans, J. M. (2010). Aquatic plants: an opportunity feedstock in the age of bioenergy. *Biofuels*, 1(2), 311–321. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.2>
- X. Flotats; A. Bonmatí (2016). Técnicas de gestión de deyecciones en zonas de alta densidad ganadera. *MG Mundo ganadero*, ISSN 0214-9192, Año 27, N°. 268, 2016, págs. 40-44
- Yu C, Irudayaraj J. (2005). Spectroscopic Characterización of Microorganisms by Fourier Transform Infrared Microspectroscopy. *Biopolymers*.77:368-377.
- Zapata, A. (1998). Utilización del biogás para generación de electricidad (en línea). ResearchEnergy. Centre for Research on Sustainable Agricultural Production Systems (CIPAV), CO. Consultado el 07 de marzo del 2005. Disponible en <http://www.cipav.org.co/cipav/resrch/energy/alvaro1.htm>
- Zhang, Y., Banks, C. (2012) Co-digestion of the mechanically recovered organic fraction of municipal solid waste with slaughterhouse wastes. *Biochemical Engineering Journal*, 68(15), pp. 129-137.



XI. ANEXO

Tabla 26. Valores de banda de adsorción IR.

Cuadro 1. Valores de bandas de absorción de IR y los movimientos vibracionales que las provocan en los enlaces moleculares de mayor interés en estudios biológicos.

Moléculas	Número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de enlace	Tipo de vibración	
Proteínas	3300	N-H (Amida A)	Tensión del enlace	
	3100-3030	N-H (Amida B)	Tensión del enlace	
	1660	C=O (Amida I)	Tensión del enlace	
		C-N	Tensión del enlace	
		N-H	Flexión del enlace	
	1630	C=O (Amida I)	Tensión del enlace	
	1545	N-H (Amida II)	Flexión del enlace	
		C-N	Tensión del enlace	
	1315	C-H	Vibraciones del esqueleto proteico	
	1300-1230	Amida III	Mezcla compleja de desplazamientos	
	1140	C-N	Tensión del enlace	
	Lípidos	2960	CH ₃ Asimétrico	Tensión asimétrica del enlace
		2930	CH ₂ Asimétrico	Tensión asimétrica del enlace
2870		CH ₃ Simétrico	Tensión asimétrica del enlace	
2850		CH ₂ Simétrico	Tensión simétrica del enlace	
1750-1720		C=O	Tensión del enlace	
1460		CH ₃ Asimétrico	Flexión asimétrica del enlace	
1440		CH ₃ Simétrico	Flexión simétrica del enlace	
1380		CH ₃ Simétrico	Flexión simétrica del enlace	
1170		COC	Flexión asimétrica del enlace	
1060		C=O	Tensión del enlace	
1035		C-H	Tensión del enlace	
Ácidos nucleicos	1240	P=O Asimétrico	Tensión asimétrica del enlace	
	1080	P=O Simétrico	Tensión simétrica del enlace	
Carbohidratos	1170	COC	Flexión asimétrica del enlace	
	1155	C-O	Tensión y flexión del enlace	

(Miller & Dumas, 2010)

Tabla 27. Especificaciones Físicoquímicas del Humus de Lombriz

Característica	Valor
Nitrógeno total	De 1 a 4% (base seca)
Materia orgánica	De 20% a 50%(base seca)
Relación C/N	≤ 20
Humedad	De 20 a 40% (sobre materia húmeda) ²
pH	de 5,5 a 8,5 ³
Conductividad eléctrica ⁴	$\leq 4 \text{ dS m}^{-1}$
Capacidad de intercambio catiónico	$> 40 \text{ cmol kg}^{-1}$
Densidad aparente sobre materia seca (peso volumétrico)	0,40 a 0,90 g mL ⁻¹
Materiales adicionados	Ausente

Fuente: NMX-FF-109-SCFI-2008



Figura 29. Recolecta de Sustrato (Pistia Stratiotes).



Figura 30. Equipos de medición de parámetros pH y CE.



Figura 31. Agitación de los reactores.



Figura 32. Bitácora de trabajo para anotaciones me peso de ST, SV Y % Cenizas.

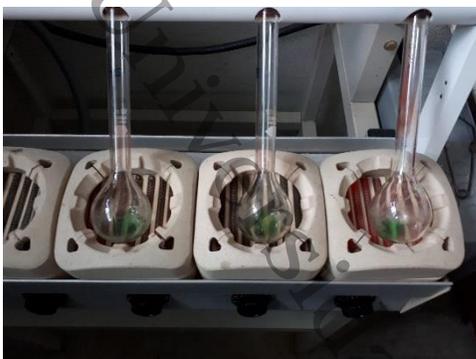


Figura 33. Digestión de la Muestra para Nitrógeno Total.



Figura 34. Medición de CE.



Figura 35. Toma de muestra para FTIR.



Figura 36. Equipo analizador de partículas por FTIR.



Figura 38. Interpretación de los Espectros de FTIR.



Figura 37. Acondicionamiento del tratamiento de la muestra para leerse por FTIR.

Producción de biogás a partir de digestión y codigestión anaerobia de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)

Daniel López Burelo



XII. ABREVIATURAS UTILIZADAS

DA: Digestión Anaerobia

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

H₂S: Ácido Sulhídrico

N: Nitrógeno

P: Fosforo

K: Potasio

FTIR: Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

ST: Solidos Totales

SV: Solidos Volátiles

SVT: Solidos Volátiles Totales

MO: Materia Orgánica

COT: Carbono Orgánico Total

DQO: Demanda Química de Oxígeno

ORP: Potencial de Oxido-Reducción

pH: Potencial de Hidrogeno

NT: Nitrógeno Total

Lech-ver: Lv, Tratamiento 1

Lech-rum: LvRum, Tratamiento 2

Lech-san: LvSan, Tratamiento 3

Lech-sec: Ls, Tratamiento 4