

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“EVALUACIÓN DE LA DEPURACIÓN DE CO₂, H₂S Y LA
CONCENTRACION DE CH₄, MEDIANTE EL TRATAMIENTO
BIOLÓGICO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris* SP) PARA
OBTENCIÓN DE BIOMETANO, A PARTIR DEL BIOGÁS
GENERADO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA
EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE INDOLMASA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

RUBEN JAVIER CALDERON LUJAN

PUCALLPA – PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
COMISIÓN DE GRADOS Y TITULOS




ACTA DE APROBACION DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
N° 139/2022-CGyT-FCFyA-UNU


En la ciudad de Pucallpa a las 8:00 am del jueves 10 de marzo de 2022, de acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Ucayali, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador en forma virtual, mediante la plataforma unificada de comunicación y colaboración Microsoft Teams, los mismos que estuvo designados con Memo Múltiple N.º 031-2022-UNU-FCFyA, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Carlos Panduro Carbajal	Presidente
Dr. Fermin Campos Solorzano	Miembro
Dra. Julissa Katy Bautista Valencia	Miembro

Se procedió a evaluar a la sustentación de la tesis denominado: “Evaluación de la depuración de CO₂, H₂S y la concentración de CH₄, mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella Vulgaris Sp*) para obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMALSA”, presentado por el bachiller **CALDERON LUJAN, RUBEN JAVIER**; asesorado por el Dr. Grober Panduro Pisco, habiendo finalizado la sustentación, se procedió a la formulación de preguntas por parte del Jurado Evaluador, las que fueron absueltas por el sustentante en consecuencia la tesis fue **APROBADO POR UNANIMIDAD Y RECOMENDACIÓN DE PUBLICACIÓN**, quedando expedito para el otorgamiento del **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**, después de las correcciones respectivas de la tesis. Siendo las 10:05 a.m. horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando los miembros en señal de conformidad.


Dr. Carlos Panduro Carbajal
Presidente


Dr. Fermín Campos Solorzano
Miembro


Dra. Julissa Katy Bautista Valencia
Miembro

ACTA DE APROBACION

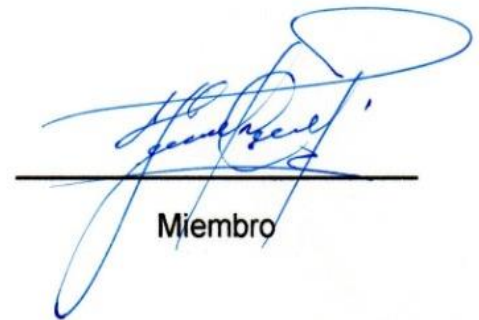
La presente tesis fue aprobada por el Jurado Evaluador de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, como requisito para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Dr. Carlos Panduro Carbajal



Presidente

Dr. Fermín Campos Solórzano



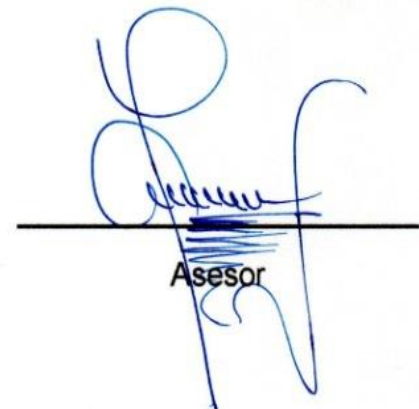
Miembro

Dra. Julissa Katy Bautista Valencia



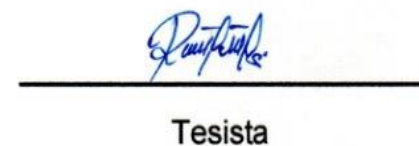
Miembro

Dr. Grober Panduro Pisco



Asesor

Bach. Ruben Javier Calderon Lujan



Tesista



UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

N°0490-2021

La Dirección de Producción Intelectual, hace constar por la presente, que el Informe final de Tesis, titulado:

“EVALUACIÓN DE LA DEPURACIÓN DE CO₂, H₂S Y LA CONCENTRACIÓN DE CH₄, MEDIANTE EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON MICROALGAS (*chlorella vulgaris* sp) PARA OBTENCIÓN DE BIOMETANO, A PARTIR DE BIOGÁS GENERADO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE, INDOLMASA-2019”

Cuyo(s) autor (es) : CALDERÓN LUJÁN, RUBÉN JAVIER

Facultad : CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Escuela Profesional : ING. AMBIENTAL
Asesor(a) : Dr. PANDURO PISCO, GROBER

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio URKUND, dicho documento presenta un **porcentaje de similitud de 2%**.

En tal sentido, de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND, el cual indica que no se debe superar el 10%. Se declara, que el trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de conformidad y verificación se FIRMA Y SELLA la presente constancia.

FECHA 17/11/2021



Dr. ABRAHAM ERMITANIO HUAMAN ALMIRON

Dirección de Producción Intelectual

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

REPOSITORIO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

Yo, RUBEN JAVIER CALDERON LUJAN

Autor de la TESIS titulada:

“EVALUACION DE LA DEPURACION DE CO₂, H₂S Y LA CONCENTRACION DE CH₄ MEDIANTE EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON MICROALGAS (Chlorella Vulgaris SP) PARA LA OBTENCION DE BIOMETANO, A PARTIR DEL BIOGAS GENERADO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE INDOLMOSA”

Sustentada el año: 2022

Con la asesoría de: Dr. GROBER PANDURO PISCO

En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Carrera Profesional de: INGENIERIA AMBIENTAL

Autorizo la publicación:

- PARCIAL** Significa que se publicará en el repositorio institucional solo La caratula, la dedicatoria y el resumen de la tesis. Esta opción solo es válida marcar si su tesis o documento presenta material patentable, para ello deberá presentar el trámite de CATI y/o INDECOPI cuando se lo solicite la DGPI UNU.
- TOTAL** Significa que todo el contenido de la tesis y/o documento será publicada en el repositorio institucional.

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes términos:

Primero: Otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali **licencia no exclusiva** para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en formato digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: Declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali y del Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 10 / 03 / 2022

Email: javier.spritz@gmail.com

Firma: 

Teléfono: 978422701

DNI: 70804766

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios quien es mi guía espiritual y es quien nos otorga la sabiduría e inteligencia, a mis padres porque ellos siempre me brindaron su apoyo incondicional, forjaron de mí una mejor persona con valores y principios, a mis hermanos y a toda mi familia que estuvieron en todo momento conmigo en las crisis y en los mejores momentos velando por mis intereses. También este trabajo es dedicado a cada docente y amistades que me brindaron su confianza, palabras de aconsejado y sus experiencias que contribuyeron para el logro de mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Lo agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de dificultad y por brindarme una vida llena de aprendizaje, experiencia y sobre todo salud y felicidad.

Le doy gracias a mis Padres Cirilo Y Donatilda por apoyarme en todo momento, por los valores que me inculcaron y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida y sobre todo por ser un ejemplo de vida a seguir.

A mi asesor, Dr. Grober Panduro Pisco, por la oportunidad de participar en el proyecto y poder realizar mi tesis, su consideración hacia mi persona y por sus exigencias y sus palabras de buenos deseos para mi desarrollo personal y profesional.

A la Universidad Nacional de Ucayali, por ser mis primeros pasos de formación profesional y el lugar donde aprendí no solo a crecer profesionalmente sino también a ser alguien con principios y valores, y también por su apoyo en el financiamiento del proyecto de investigación.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
INDICE GENERAL.....	viii
INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 HIPÓTESIS.....	7
1.4.1 Hipótesis alterna (Ha).....	7
1.4.2 Hipótesis nula (H0).....	7
1.5. COMPONENTES ESTUDIADOS.....	7
1.5.1 Variable independiente.....	7

1.5.2 Variable independiente.....	7
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 ANTECEDENTES.....	8
2.2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA.....	11
2.2.1. El biogás	11
2.2.2. Características del biogás	12
2.2.3. El biodigestor	13
2.2.4. Tipos de biodigestores	14
2.2.5. Modelos o diseño de biodigestores	15
2.2.6. Fotobiorreactores	17
2.2.7. Abiertos.....	18
2.2.8. Cerrados	20
2.2.9. Sistemas de cultivo de microalgas	23
2.2.10. Composición típica del Gas Natural en el Perú	23
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICO	25
CAPITULO III. METODOLOGIA.....	27
3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA.....	28
3.2.1. Ubicación	28
3.2.2. Población	29
3.2.3. Muestra	30
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	30

3.3.1. Técnicas.....	30
3.3.2. Instrumentos	31
3.4. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	32
3.4.1. Antes de la evaluación	32
3.4.2. Durante la evaluación.....	36
3.4.3. Después de la evaluación	38
3.5. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	40
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEPURADA DE LAS MICROALGAS	41
4.1.1. Composición volumétrica del biogás	41
4.1.2. Depuración de CO ₂ y H ₂ S por tratamiento biológico.....	42
4.1.3. Concentración de CO ₂ en el biogás	44
4.1.4. Concentración de metano con el tratamiento biológico	45
4.1.5. Poder calorífico con el tratamiento biológico	48
4.2. DISCUSIONES	49
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1. CONCLUSIONES	54
5.2. RECOMENDACIONES	56
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	57
ANEXOS.....	66
Anexo 1. Iconografía.....	67

Anexo 2. Resultados de laboratorio	73
Anexo 3. Matriz de consistencia	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de biogás derivado de diversas fuentes.	12
Tabla 2. Composición de Gas Natural	24
Tabla 3. Tratamiento del biogás y sus réplicas	37
Tabla 4. Concentración de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y un testigo. 42	
Tabla 5. Prueba de Anova para la concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y testigo	43
Tabla 6. Prueba de Tukey HSD para la concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y testigo	43
Tabla 7. Concentración de metano en el biogás obtenido con el tratamiento (microalgas, biol y agua) y un testigo.	45
Tabla 8. Prueba de Anova para la concentración de metano en el biogás obtenido con los tratamientos (microalga, biol y agua) y un testigo. ..	46
Tabla 9. Prueba de Anova para la concentración de metano en el biogás obtenido con el tratamiento (microalga, biol y agua) y un testigo.	46
Tabla 10. Poder calorífico del biogás purificado obtenido con el tratamiento químico.	48
Tabla 11. Concentración de Dióxido de Carbono (CO ₂), Ácido Sulfhídrico (H ₂ S), Metano (CH ₄) y poder calorífico en el biogás obtenido en el testigo y en los tratamientos (T ₁ , T ₂ y T ₃)	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de biodigestores	15
Figura 2. Modelos de biodigestores	17
Figura 3. Procesos de purificación del biogás	28
Figura 4. Mapa de ubicación del área de investigación	29
Figura 5. Área de trabajo.....	33
Figura 6. Fotobiorreactor número 1	35
Figura 7. Fotobiorreactor número 2.....	35
Figura 8. Fotobiorreacto número 3 y almacenamiento del biometano	36
Figura 9. Composición porcentual de biogás.....	41
Figura 10. Concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (Microalgas, biol y agua)	44
Figura 11. Concentración de metano en el biogás obtenido con los tratamientos (Microalgas, biol y agua)	47
Figura 12. Poder calorífico obtenido con el tratamiento biológico	48
Figura 13. Producción de Biogás	67
Figura 14. Almacenamiento de BIOGAS antes del tratamiento	67
Figura 15. Obtención de cepas de microalgas chlorella vulgaris	68
Figura 16. Solución de microalgas antes del tratamiento	68
Figura 17. Fotobioreactor de purificación de biogás	69
Figura 18. Agregado de Biol, como nutrientes para la microalgas	69
Figura 19. Inyección de BIOGAS al Fotobioreactor para el tratamiento.....	70
Figura 20. Lectura de gases del biogás purificada, salida del Fotobiorreactor.	70
Figura 21. Almacenamiento de biogás purificado	71

Figura 22. Recolección de muestra para prueba de quemado.	71
Figura 23. Quema del biogás purificado (biometano)	72
Figura 24. Recolección de muestra para análisis de la composición de biogás purificado (biometano) en laboratorio.	72
Figura 25. Resultado de análisis de biogás del laboratorio intertek, referencia laboratorio. 00045H/20 (C) tratamiento N° 2 Microalgas (chorella vulgaris).	73
Figura 26. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio del cultivo de microalgas Antes del tratamiento de biogás	74
Figura 27. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del cultivo de microalgas después del tratamiento de biogás	75

RESUMEN

El biogás con su composición de gases (CH_4 , H_2S y CO_2) es altamente contaminante al ambiente y a la salud humana, pero es recomendable su aprovechamiento como combustible, siendo necesario someterlo a purificación mediante tratamiento biológico usando la microalga (*Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890). Se evaluó el proceso de depuración de CO_2 y H_2S para la obtención del biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de una planta extractora de palma de aceite, aplicando microalgas (MA), agua y biol en diferentes proporciones para determinar la eficiencia de absorción de los fotobiorreactores diseñados para cada tratamiento: T_0 (0 % MA y 60 L H_2O y 0 mL Biol); T_1 : (10 % MA, 60 L H_2O y 50 mL Biol); T_2 : (30 % MA, 60 L H_2O y 100 mL Biol), y T_3 : (60 % MA, 60 L H_2O y 150 mL Biol) en los cuales se midieron las concentraciones de CH_4 . Los resultados registran una mayor fijación de CO_2 en el T_2 con 26% de concentración de CO_2 y 74% de metano empleado en un flujo continuo de 200 L de biogás. T_0 y T_1 con una concentración de 32% y 39% de CO_2 , respectivamente. Se concluye que el tratamiento biológico con MA para la remoción del CO_2 , muestra el valor más alto de remoción para el T_2 , reduciendo en 13,6% la concentración de CO_2 del valor inicial del biogás, y una menor depuración de CO_2 se observó en el tratamiento T_3 .

Palabras clave: Biogás – Biometano – Fotobiorreactor – Microalgas – Purificación Biológica

ABSTRACT

Biogas with its composition of gases (CH₄, H₂S and CO₂) is highly polluting to the environment and human health, but its use as a fuel is recommended, but it is necessary to subject it to purification first through biological treatment using the microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890). The CO₂ and H₂S purification process was evaluated to obtain biomethane, from the biogas generated from the effluents of an oil palm extraction plant, applying microalgae (MA), water and bio-oil in different proportions to determine the absorption efficiency of the photobioreactors designed for each treatment: T₀ (0% MA and 60 L H₂O and 0 mL Biol); T₁: (10% MA, 60 L H₂O and 50 mL Biol); T₂: (30% MA, 60 L H₂O and 100 mL Biol), and T₃: (60% MA, 60 L H₂O and 150 mL Biol) in which CH₄ concentrations were measured. The results show a higher CO₂ fixation in T₂ with 26% CO₂ concentration and 74% methane used in a continuous flow of 200 L of biogas. T₀ and T₁ with a concentration of 32% and 39% of CO₂, respectively. It is concluded that the biological treatment with MA for CO₂ removal shows the highest removal value for T₂, reducing by 13,6% the CO₂ concentration of the initial biogas value, and a lower CO₂ clearance was observed in T₃ treatment.

Keywords: Biogas – Biomethane – Photobioreactor – Microalgae – Biological Purification.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático es más evidente debido a las constantes emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) [Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido de nitrógeno (N_2O)]. El informe del MINAM (2019) registra que el 75,2% de las emisiones corresponden a CO_2 , el 15,1% a CH_4 y el 9,6% a N_2O . El origen de las emisiones de CO_2 es principalmente de los sectores USCUS (Sector Uso de Suelo, Cambio de Uso de suelo y Silvicultura) (57,8%) y Energía (37,5%), mientras que las emisiones de CH_4 provienen en un 45,1% del sector Agricultura, y el 35,9% del sector desechos.

Asimismo, uno de los mayores impedimentos para la utilización del biogás para generar energía eléctrica son sus impurezas, y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) es una de las sustancias que lo contaminan con una mayor frecuencia y cantidad (CE, 2020). Esta situación requiere buscar una estrategia para contribuir a la disminución de emisión de GEI mediante la utilización de microalgas (MA) (Emparan et al., 2020; Jasni et al., 2020). La biometanización consiste en la digestión anaeróbica de sustancias orgánicas con la consecuente purificación del biogás, mejorando su calidad y contenido energético; además de minimizar problemas de carácter operacional y de toxicidad con la eliminación de CO_2 (Varnero et al., 2012; Brar et al., 2020). Las MA fotosintéticas, por su alta capacidad de captura y fijación de CO_2 y por su utilidad en la producción de biomasa, se puede emplear para purificar biogás y obtener energía por su elevado contenido en metano, aunque también puede contener elevadas concentraciones de contaminantes (ácido sulfhídrico y siloxanos), que deben ser eliminados previamente (Carrillo, 2019; Brar et al., 2020; Zabed et al., 2020).

La purificación del biogás brinda alternativas y posibilidades de uso, por lo que a nivel rural, el tratamiento para mejorar el biogás con MA tiene un gran potencial para la producción de energía renovable y respetuosa con el medio ambiente, la integración de proceso de cultivo de MA para eliminar CO₂ del biogás y el tratamiento de aguas residuales, son estrategias prometedoras y sostenibles (Cheah et al., 2020; Ding et al., 2020; Elystia et al., 2020; Srinuanpam et al., 2020; Zabed et al., 2020).

Por otro lado, los efluentes (lodos) de la extracción del aceite de palma son muy concentrados y contaminantes del suelo y agua, si son vertidos directamente debido a que la descomposición de sus compuestos orgánicos producen GEI (Cheah et al., 2020), y consecuentemente impactan en el cambio climático, debido a que la generación del efluente oscila en promedio de 0,8 m³ por t de racimo de fruta procesada, con una DQO entre 65,000 y 120,000 mg·L⁻¹ y una carga equivalente a aproximadamente 50 kg de DQO por t de fruto procesado. La DBO₅ es de aproximadamente 48,000 (mg·L⁻¹) y grasas y aceites mayor de 2,000 (mg·L⁻¹), y por cada m³ de efluentes procesados en un biodigestor se puede producir un promedio de 30 m³ de biogás (Engineering, 2020). El Biol es el producto líquido que queda de la digestión anaerobia y es un importante fertilizante que contiene nitrógeno, fósforo, potasio y 85% de materia orgánica con un pH de 7,5 (Herrero, 2008). Por ende, el objetivo de la presente investigación fue realizar la purificación biológica del biogás procedentes de lodos de planta de palma aceitera, utilizando MA.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El biogás obtenido directamente de la digestión anaerobia tiene un alto contenido en CO_2 y H_2S junto con otros contaminantes en menor proporción como compuestos orgánicos volátiles (COVs), siloxanos, humedad, etc. La presencia de estos compuestos reduce la calidad y el contenido energético del biogás, además de generar problemas de carácter operacional y de toxicidad.

El CO_2 se encuentra en concentraciones muy altas, pudiendo superar el 50% en volumen del biogás. Esto provoca dos problemas básicos, la baja eficiencia del biogás debido al alto contenido en un gas no útil desde el punto de vista energético, y el aumento de coste en su transporte. Además de estas desventajas, no hay que olvidar que el CO_2 es un contaminante que fomenta el efecto invernadero Varnero, M.T., Carú, M., Galleguillos, K. y Achondo, P. (2012).

El H_2S se encuentra en porcentajes muchos menores que el CO_2 , aproximadamente entre el 0,1-3% en volumen. Esto no supone que podamos obviarlo ya que es un fuerte contaminante, posee mal olor, y puede provocar molestias y síntomas más graves que pueden llegar a la hospitalización o incluso la muerte. Con sólo una concentración de 20-50 ppm una exposición continuada puede acabar con la vida de un ser humano, y por encima de 500 ppm provoca el mismo resultado, pero en un espacio de tiempo breve. Por último, este gas es muy corrosivo y puede dañar distintas partes del sistema utilizado para la combustión del biogás. Por ello su eliminación es obligatoria, evitando así daños en el sistema, en el medio ambiente y en la salud humana.

También podemos incluir entre los contaminantes la presencia de humedad, pues ésta reduce drásticamente el PCI (Poder Calorífico Inferior) del biogás y puede provocar reacciones con ciertos compuestos como el H₂S y dar lugar a ácidos corrosivos. Estos ácidos son peligrosos ya que pueden dañar el recipiente en su transporte y almacenamiento, o incluso el mismo sistema utilizado para la combustión del biogás.

En menores concentraciones, el biogás puede contener hidrocarburos halogenados, como F o Cl, que pueden también producir corrosión, así como siloxanos, otro compuesto cuya eliminación es importante pues puede depositar sílice en el sistema.

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas existen fuertes evidencias de que el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero debidas a actividades antropogénicas es la causa del aumento de la temperatura media en la Tierra (IPCC, 2005). Se cree que, como consecuencia del aumento de la temperatura media global, está cambiando el clima del planeta, es el llamado cambio climático. Los principales gases de efecto invernadero responsables del aumento de temperaturas son: dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y un grupo de compuestos gaseosos que contienen cloro y flúor, como halogenuros de carbono, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿Habrá depuración de CO₂ y H₂S para una alta concentración de CH₄, mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) para la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite “Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A.” (INDOLMASA)?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué Cantidad de CO₂ y H₂S se podrá depurar mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) para la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA?
- ¿Cuánto será la concentración de CH₄ obtenido mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) para la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA?
- ¿Cuál es el potencial energético del Biometano obtenido de la purificación mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la Depuración del CO₂ y H₂S para una alta concentración de CH₄, mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) en la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad porcentual de CO₂ y H₂S, depurada mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) en la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA.
- Determinar la concentración porcentual de CH₄ obtenido mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) en la obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA.
- Determinar el potencial energético del Biometano obtenido de la purificación mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, SP) en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis alterna (Ha)

La depuración del CO₂ y H₂S del biogás es eficiente mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris SP*), a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA.

1.4.2 Hipótesis nula (H0)

La depuración del CO₂ y H₂S del biogás no es eficiente mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris SP*), a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA.

1.5. COMPONENTES ESTUDIADOS

1.5.1 Variable independiente

[X1] = Depuración de CO₂

[X2] = Depuración de H₂S

1.5.2 Variable dependiente

[Y1] = Eficiencia del tratamiento biológico (*Chlorella vulgaris, SP*)

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Sánchez et al (1997), en su tesis “purificación de biogás mediante cultivo de microalgas”, afirma que los cultivos de microalgas pueden ser aprovechados para purificar biogás, ya que las microalgas utilizan el dióxido de carbono tanto como fuente de carbono inorgánico como para regular el pH del medio. En este trabajo se seleccionó un cultivo de *Arthrospira rnaaitna* para la absorción de CO₂ presente en el biogás proveniente de un reactor anaerobio. Con este fin, se diseñó y probó un prototipo (gasificador) de campana con un difusor para el burbujeo de la mezcla gaseosa en el cultivo. Los resultados probaron un significativo enriquecimiento de metano en la corriente gaseosa a la salida del prototipo y, además que el sistema garantiza la disponibilidad de fuente de carbono para el crecimiento de la población microalgal.

El trabajo “Purificación de biogás a través de cultivo de microalgas en residuos agroindustriales” presentado por Miyawaki, (2014); nos indica que reducir la oferta son los principales desafíos. Así, el uso del biogás como fuente de energía. Se muestra prometedor especialmente en regiones agrícolas donde hay una gran disponibilidad de residuos que pueden convertirse en energía, reduciendo los costos de producción e impactos ambientales. Sin embargo, la presencia de impurezas en el biogás Reduce su calidad. Una alternativa para mejorar la utilización del biogás es Elimine las impurezas de su composición, como el dióxido de carbono (CO₂). El CO₂ puede convertirse biológicamente en materia orgánica por fotosíntesis de los organismos como las microalgas. Este

estudio evaluó el proceso de purificación. De biogás derivado de la digestión de las aguas residuales a través del autótrofo cultivo de microalgas *Scenedesmus disciformis*. Los experimentos fueron realizados en fotobiorreactores aéreos (12 L) en condiciones ambientales. Tres diluidos Se utilizaron efluentes de biodigestores como cultivo alternativo (estiércol de cerdo 5%, doméstico aguas residuales 25% y estiércol de ganado 30%). En estos experimentos, la capacidad de Se verificó el crecimiento de microalgas con inyección de biogás en el cultivo, como Bueno, la purificación de biogás por el sistema. La productividad máxima de biomasa obtenido en los cultivos fue de $2,0 \pm 0,16 \text{ g.L}^{-1}$ produciendo un nivel de 26% de lípidos para el estiércol de cerdo con inyección de biogás. La concentración celular máxima obtenida era $13257 \pm 430 \times 10^4 \text{ cél. mL}^{-1}$ con estiércol de cerdo y biogás. La concentración de metano en el biogás purificado alcanzó el 95% (v / v), con una eficiencia del 88% en el enriquecimiento de biogás. El valor calorífico aumentó de 5592 a 8372 kcal.m⁻³. Las microalgas *Scenedesmus disciformis* pudo eliminar 60 – 99,3% de las nutrientes del efluente del cerdo (nitrito, amoníaco y fósforo). Estos resultados demostrar la alta eficiencia de las microalgas para purificar el biogás y su capacidad para biorremediar efluentes urbanos y agroindustriales, reduciendo el costo de producción y produciendo biomasa de alta calidad.

Las microalgas y cianobacterias son plantas microscópicas que eventualmente crecen suspendidas en agua y realizan procesos fotosintéticos igual que las plantas superiores terrestres: la conversión de agua y CO₂, utilizando la energía de la luz solar, en oxígeno y biomasa.

Sin embargo, de todos los organismos capaces de fijar o acumular CO₂, microalgas y cianobacterias cobran una importancia y especial debido a que presentan ciertas ventajas únicas. (Benemann, 1992)

Son los únicos organismos fotosintéticos capaces de utilizar directamente el CO₂ de una corriente de gases de combustión, como puede ser el de centrales térmicas (a base de carbón, fuel o metano), sin necesidad de tratamientos previos, ya que son resistentes a altas concentraciones de CO₂. A diferencia de los cultivos vegetales o árboles, las microalgas mejoran su productividad con el aumento, hasta cierto límite, de la concentración de CO₂ respecto a la atmosférica. Contiene un potencial de productividad mucho mayor que el de las plantas terrestres superficiales y otras plantas acuáticas

Para su cultivo pueden utilizarse ciertos recursos que no son adecuados para el consumo humano, como aguas salobres, aguas residuales y aguas residuales industriales. Además, su alto requerimiento de nutrientes (principalmente N y P) permite su cultivo en aguas residuales, aportando el beneficio adicional de la reducción de los contenidos de nitrógeno y fósforo en dichas aguas.

Lizbeth et al (2017), en su informe realizado “evaluación de procesos necesarios para captación y/o almacenamiento de CO₂ como una medida de reducción al impacto ambiental”, afirma que la captura de CO₂ se ha convertido en un reto, sin embargo, existen diferentes métodos que conllevan a minimizar la cantidad de emisión de CO₂ al medio ambiente y son amigables con el mismo. Haciendo alusión a los métodos existen diferentes tipos, desde físicos, químicos, hasta biológicos; dentro

de estos encontramos los “cultivos de microalgas”. Las microalgas son microorganismos que crecen muy rápido y se caracterizan por tener facilidad para fijar CO₂ con mayor rapidez que otros sistemas biológicos. Por lo tanto, es necesaria la optimización de un ambiente que sea apto para el desarrollo de estos microorganismos. El método se basa en evaluar el comportamiento de los microorganismos en la captura de CO₂, variando las concentraciones de nutrientes como el fósforo y/o el nitrógeno bajo determinadas condiciones, para establecer cuál es la concentración óptima para una eficaz captura de CO₂. Por medio del software statistica versión 7, que establece estimados estadísticos, gráficas, tablas, resaltando cuál de los nutrientes tendrá una mayor incidencia en el microorganismo. Así con la producción de biomasa y los resultados obtenidos diferenciar este método de captura con respecto a los demás existentes para este propósito, cuya principal característica se enfoca en un menor consumo de agua y de energía. Finalmente generar un análisis de costo – beneficio para determinar la viabilidad del proyecto e incentivar su aplicación en la industria como una medida de mitigación al impacto ambiental.

2.2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA

2.2.1. El biogás

Es un combustible con contenido energético medio (~22MJ/kg), derivado de la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas (Horikawua, 2001)

El poder calorífico del biogás es proporcional a su concentración de metano. Para ser usado como combustible en los

motores de combustión interna, se ha recomendado una concentración de CH₄ mayor al 90% (Harasimowicz, Journal of Hazardous Materials, 2007). Sin embargo, el CO₂ tiene una concentración aproximada de 40%. Esta alta concentración reduce el poder de salida del motor proporcionalmente a su concentración, limitando el uso del biogás en plantas de generación eléctrica impulsado por motores de combustión interna. (Marchaim, 1992)

2.2.2. Características del biogás

La tabla siguiente resume la composición promedio del biogás según la fuente. El valor calorífico varía entre 17 y 34 MJ/m³ según el contenido del metano.

Tabla 1.

Composición de biogás derivado de diversas fuentes.

Composición del biogás derivado de diversas fuentes					
Gases	Desechos agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%	combustible
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	ácido, asfixiante
Vapor H ₂ O	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	corrosivo
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	combustible
H ₂ S	100-7000ppm	0-1%	0-8%	0.5-100ppm	Corrosivo,olor tóx.
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	trazas	corrosivo
CO	0-1%	0-1%	0-1%	trazas	tóxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%	inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5ppm	corrosivos, olores

Fuente: (Dagoberto, 2005):

2.2.3. El biodigestor

Es una alternativa sencilla y práctica que sirve para aprovechar los desechos orgánicos que se producen en las fincas. El proceso permite convertir el estiércol de los animales y algunos rastrojos de cosechas en gas metano para cocinar y en abonos para cultivos, contribuyendo en la economía familiar, al bajar los costos de producción mejorando el ambiente. Existen diferentes tipos de biodigestores; varían según los desechos a tratar, condiciones del terreno, etc. (Dagoberto, 2005)

El cual está formado de 5 partes:

-Pila de carga. Es una pileta pequeña donde se deposita y se mezclan los materiales que alimentan el tanque digestor. Debe estar a mayor altura que el nivel de carga del digestor (tanque totalmente lleno).

-El digestor. Es un tanque alargado excavado en la tierra, dentro de él los desechos son descompuestos. Por un extremo se conecta el tubo de pila de carga y por el otro la pila de descarga.

-Pila de descarga. Sirve para retirar los residuos provenientes del tanque que fueron digeridos. Está conectado a menor nivel que la pileta de carga.

-Cubierta plástica. Se coloca sobre el tanque digestor, cierra la entrada de aire al interior de mismo y almacena el gas producido.

-Tubería, válvula y llave de paso. Se conecta una tubería en la parte superior de la cubierta plástica que conduce el gas donde será aprovechado; además, se conecta una sencilla válvula de

seguridad que evita la sobre presión interna en la cubierta plástica y elimina el agua condensada en la tubería. También es importante una llave que permita el paso del gas cuando se necesita.

2.2.4. Tipos de biodigestores

(Schlaefli, 2010), afirma que la siguiente clasificación es según el periodo de alimentación es la siguiente:

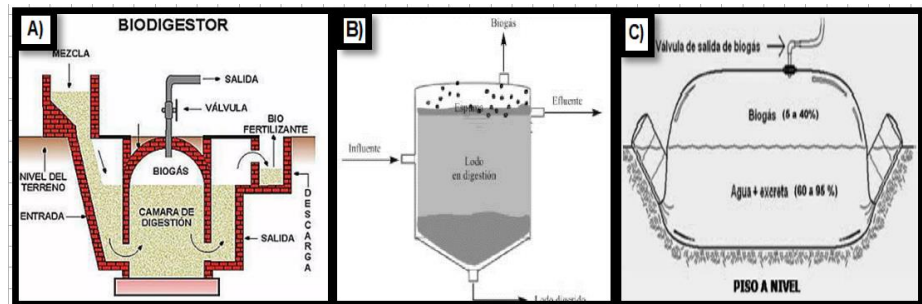
-Sistema Discontinuo. Conocidos también como de carga ya que se carga solo una vez en forma total y luego se cierra herméticamente por unos 20 a 50 días, donde se descarga después que deje de producir gas. El modelo tipo Batch es el más conocido de este sistema.

-Sistema Semicontinuo. Son pequeños o de mediana escala, de uso urbano o rural. Presenta buena eficiencia de producción de biogas diaria. Los modelos que destacan en este sistema son del tipo hindú, el tipo chino y otro de menor costo del tipo manga de polietileno.

-Sistema Continuo. Tienen flujo constante de biomasa activa en su interior. Son grandes sistemas sofisticados, donde emplean equipos comerciales para alimentarlo, darles calefacción, agitación y control.

Figura 1.

Tipos de biodigestores



Nota: A). Biodigestor continuo B). Biodigestor discontinuo C) Biodigestor semi-continuo

Fuente: Schlaefli, 2010

2.2.5. Modelos o diseño de biodigestores

En general, las plantas de biogás simples que se conocen pueden ser divididas en tres tipos (ver Fig. 2).

(Guardado Chacón, 2007) El diseño y dimensionamiento de un biodigestor depende, en lo fundamental, de los factores siguientes:

- Tipo y composición del material orgánico que se debe emplear para la biodigestión.
- Demanda de biogás y de biofertilizante.
- Materiales de construcción que se deben emplear.
- Tecnologías constructivas apropiadas.
- Facilidad de explotación y mantenimiento.
- Posibilidad económica del usuario.

Las plantas de tecnología simple, según el régimen de carga o llenado, se clasifican en dos tipos fundamentales: de flujo

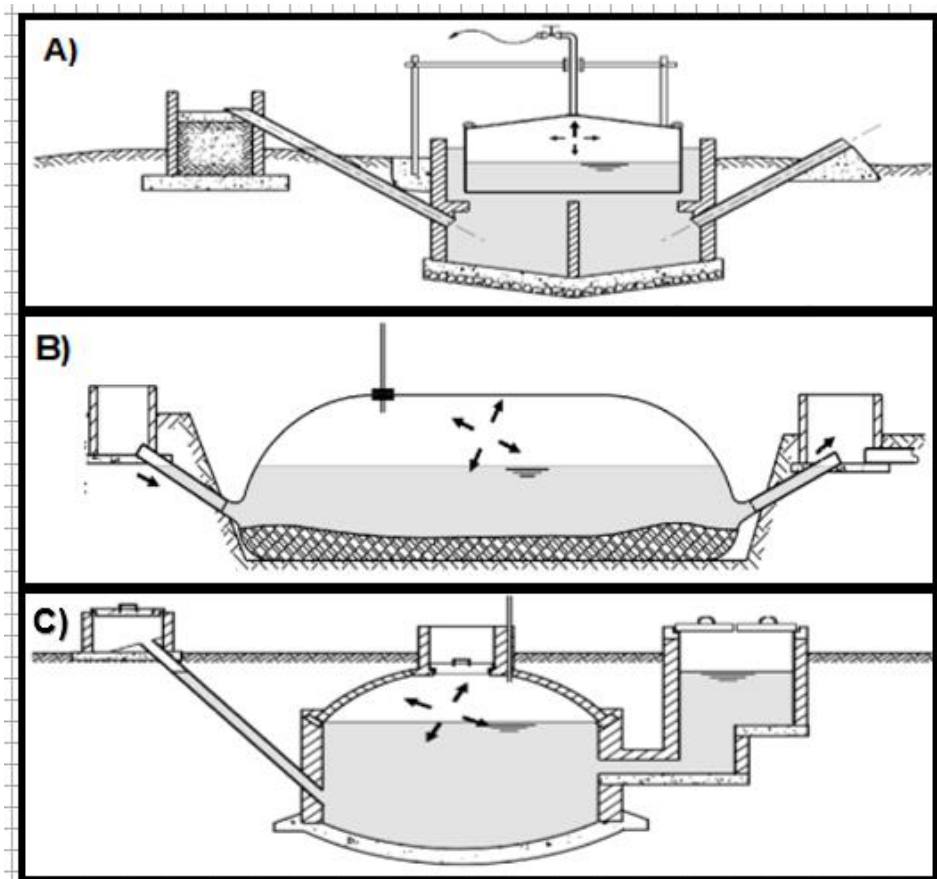
continuo, mayormente empleadas para la obtención de volúmenes considerables de gas; y las de flujo discontinuo o Batch, para pequeñas producciones de biogás.

La gran ventaja de las primeras es que las bacterias metanogénicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen biogás de manera más uniforme. Las plantas de tecnología simple más empleadas, y de flujo continuo, pueden agruparse en dos tipos ampliamente desarrollados en la práctica:

- a) Planta de cúpula móvil, en la cual el gasómetro (compuesto generalmente por planchas metálicas) flota sobre el material orgánico en fermentación.
- b) Planta de cúpula fija, en la que el gas se almacena en la parte superior debido al desplazamiento gaseoso.

Figura 2.

Modelos de biodigestores



Nota: A). Biodigestor de campana flotante (tipo hindú), B). Biodigestor de bolsas elásticas (tipo balón), C). Biodigestor de cúpula fija (tipo chino).

Fuente: (José A. chacón, 2007)

2.2.6. Fotobiorreactores

Tredici, 2004 & Makareviciene et al., 2013 plantean que las características deseables en un biorreactor son:

- Ser universal y adecuado para el cultivo de varias especies de microalgas

- Proporcionar la mayor cantidad de luz posible
- Proporcionar un buen intercambio gaseoso de CO₂ y O₂
- Minimizar la sedimentación de las microalgas y su adhesión a la superficie del reactor
- Poseer una tasa alta de transferencia de masa y temperatura sin dañar a la célula o inhibir su crecimiento
- Baratos de construir y operar
- Fácilmente escalables

En el diseño y ubicación de un reactor se debe tener en cuenta la relación superficie/volumen, la orientación e inclinación, acumulación de oxígeno y difusión de dióxido de carbono, mezclado, temperatura y coste. (Tredici, 2004)

Atendiendo a su diseño, los reactores utilizados a gran escala en la producción foto autótrofa de microalgas se clasifican en abiertos y cerrados.

2.2.7. Abiertos

Los estanques abiertos fueron los primeros sistemas de cultivo a la intemperie desarrollados a escala industrial para el cultivo de *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina*. La explotación de estos sistemas de cultivo puede ser intensiva o extensiva. El sistema abierto de tipo extensivo utiliza grandes superficies (entre 5 y 50 ha) sin agitación mecánica, con una orientación tal que la turbulencia ocasionada por los vientos predominantes en la zona permita una cierta homogeneización y movimiento de la masa líquida. La explotación extensiva se corresponde con el modo de

operación de los lagos naturales, que se han empleado en la producción de hasta $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de biomasa comestible (Chaumont, 1993). Los sistemas de cultivos intensivos son estanques horizontales poco profundos tipo carrusel o "raceway". Cada unidad de cultivo ocupa un área de entre varios cientos y pocos miles de metros cuadrados, estando compuesta de dos o más pistas niveladas de 2 a 10 m de ancho y 15-30 cm de profundidad, separadas entre sí por tabiques verticales, pudiendo adoptar un sistema de meandros. A lo largo de estos canales, cuyo piso y paredes suelen estar recubiertos por una capa de plástico inerte, fluye la suspensión celular a una velocidad de 0,2 a 0,5 m s^{-1} , impulsada por la acción de paletas giratorias, hélices o bombas. El carbono inorgánico se suministra según las necesidades del cultivo, lo que se controla generalmente por medio de un Ph estato y una válvula solenoide, de forma que se insufla CO_2 cuando el pH supere un valor crítico, hasta restablecer el pH óptimo para el crecimiento. El cultivo en masa de microalgas en estanques abiertos combina características típicas de los cultivos agrícolas (uso extensivo de terreno, agua y nutrientes, así como dependencia del clima y de la radiación solar), con otras que asemejan la acuicultura y, sobre todo, con aquellas propias de procesos industriales para el cultivo de microorganismos, tales como operación continua, aporte dosificado de nutrientes y control del proceso de producción. (García et al., 2006)

2.2.8. Cerrados

Los sistemas de cultivo cerrados, de mayor sofisticación tecnológica, representan la alternativa a los estanques abiertos, aportando mejores condiciones para cultivar cualesquiera microalgas al dificultar la invasión por organismos contaminantes. De hecho, algunas microalgas sólo pueden ser cultivadas en reactores cerrados puesto que se contaminan con facilidad. (Pulz et al., 2001).

Los sistemas cerrados presentan múltiples ventajas frente a los reactores abiertos como un uso más eficiente de la irradiancia, que conduce a la producción de cultivos más concentrados, la posibilidad de cultivar todo el año, una disminución de las pérdidas por evaporación, un mejor control de algunas variables como la temperatura y mayor facilidad de operación en continuo. (Tredici, 1992; Borowitzka, 1999 & Grobbelaar, 2009).

Existen varios diseños de reactores cerrados, siendo el reactor tubular el ejemplo más representativo, considerándose los reactores planos un punto intermedio entre los sistemas de cultivos abiertos y cerrados. (Pulz et al., 1998).

- **Reactor tubular.** Los fotobiorreactores tubulares consisten esencialmente en tubos transparentes de vidrio o material plástico, conectados en serie o en paralelo para formar el colector solar, a través del cual se recircula la suspensión celular. Los tubos pueden estar dispuestos en horizontal (Molina et al., 2001), en vertical (Converti et al., 2006),

formando una espiral (Ación et al., 2003), o inclinados (Vunjak et al., 2005). Para maximizar el empleo del terreno se ha situado en algunos casos un segundo nivel de tubos que están desplazados sobre los del nivel inferior (Torzillo et al., 1993). La recirculación de la suspensión por el fotobiorreactor se realiza mediante bombas mecánicas o sistemas "airlift", en los que el flujo de aire sustenta el movimiento de la masa líquida. Los sistemas tubulares con circulación impulsada por "airlift" son robustos y menos susceptibles a la contaminación que los basados en bomba mecánica, estando las células menos expuestas a sufrir daños que en este último caso. El airlift cumple la doble función de bomba y de intercambiador de gases, eliminando el exceso de oxígeno generado fotosintéticamente, que acumula el cultivo en su recorrido por el colector solar (Eriksen, 2008). El diseño del reactor debe tener en cuenta el flujo idóneo y el adecuado intercambio gaseoso, además de maximizar la captura de luz, a la vez que se minimiza la ocupación de superficie. El diámetro del tubo debe estar entre 2 y 15 cm, siendo el valor óptimo de aproximadamente 10 cm. El tamaño de la unidad de este tipo de reactor no debería sobrepasar los 5,000 L. La mayor planta en operación basada en reactores tubulares (de disposición vertical) se encuentra en Klötze, Alemania, (600,000 L) y se

dedica a la producción de biomasa microalgal (*Chlorella*) para consumo humano.

- **Reactor plano vertical.** Los reactores planos son aquellos en los que el cultivo queda dispuesto en una lámina orientada de manera que la luz incida directamente sobre ella. Los primeros reactores planos verticales se desarrollaron en la década de los 50 (Burlew, 1953). Su diseño y componentes han variado desde su origen (Tredici et al., 1992; Pulz et al., 1995 & Hu et al., 1996) hasta la actual bolsa de PVC contenida y soportada por una estructura rígida, que supone una reducción sustancial del coste de estos reactores (Tredici, 2004 & Sierra et al., 2008). El sistema puede termostatizarse mediante un intercambiador de calor colocado en su interior. La agitación de estos reactores se realiza generalmente inyectando aire en la base del mismo, lo que supone en algunos casos estrés hidrodinámico para las células (Sánchez et al., 1999). Estos sistemas semiabiertos, con propiedades híbridas de estanques y sistemas cerrados, presentan un interesante potencial para su empleo en aproximaciones masivas, como serían aquellas dirigidas al aprovechamiento de las microalgas para la captura de CO₂ y/o la generación de biomasa para su empleo como materia prima de biocombustibles. Se ha citado mayor productividad por unidad de área para estos sistemas que la de estanques y

reactores tubulares en el cultivo de *Chlorella* en Alemania (Pulz et al., 1995).

2.2.9. Sistemas de cultivo de microalgas

El cultivo de las microalgas se puede realizar de dos formas, con piscinas/estanques (fotobiorreactores abiertos), tanto al aire libre como cubiertas, como los reactores raceway, y con fotobiorreactores cerrados, como los tubulares.

Los fotobiorreactores abiertos presentan mayor facilidad en su operación, ya que no requieren elevado mantenimiento. Constan de un recipiente muy largo que posee una o más curvas para cambiar su sentido y así aprovechar el espacio. El agua es impulsada por unas palas accionadas por un motor y/o por gravedad por inclinación del circuito recorrido por el agua a través del reactor. La mayoría está al aire libre y ocupan un gran espacio, pudiendo superar una hectárea, y en consecuencia contener volúmenes de agua de miles de metros cúbicos, pues la profundidad suele estar entre 0,2 y 0,5 metros para permitir la penetración de la luz solar.

2.2.10. Composición típica del Gas Natural en el Perú

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentra frecuentemente en yacimientos fósiles, no asociado (solo), disuelto o asociado (acompañando al petróleo) o en depósitos de carbón.

Tabla 2.*Composición de Gas Natural*

COMPONENTE	GAS NO ASOCIADO	GAS ASOCIADO			
	CAMISEA	LOTE Z - 2B	LOTE VI	LOTE X	GMP
N2	0.51	0.2796	0.2294	0.1541	0.4477
CO2	0.53	1.2703	0.3060	0.5320	0.4393
C1	83.39	86.3218	87.1112	90.2791	85.2500
C2	9.49	5.6168	6.3257	4.0699	6.3681
C3	3.39	3.0423	3.0128	1.8627	3.6630
i-C4	0.46	0.9022	0.8102	0.7231	1.0753
n-C4	0.88	1.2519	1.1895	0.9068	1.3753
i-C5	0.30	0.5093	0.4864	0.4980	0.5606
n-C5	0.28	0.3113	0.2978	0.3007	0.3138
C6	0.28	0.4945	0.2310	0.6736	0.5069
Benceno	0.01				
C7	0.18	-	-	-	-
C8	0.11	-	-	-	-
C9	0.03				
C10	0.01				
H2O	0.14				

Fuente: Osinergmin

✓ **Remoción de gases ácidos**

Se denominan gases ácidos al H₂S y al CO₂, por formar una solución de características ácidas en presencia de agua. La remoción del CO₂ se hace principalmente, para controlar el poder calorífico del Gas Natural y para evitar la formación de hielo seco y/o CO₂ sólido en los flujos de gas que serán sometidos a procesos criogénicos.

La extracción del H₂S se realiza principalmente: – Por ser tóxico. – Disuelto en H₂O es corrosivo al acero. • Métodos aplicables: – Sulfinol – Aminas: DEA, MDEA.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICO

- **Microalgas.** Las microalgas son unos microorganismos fotosintéticos microscópicos. Sus características son similares a las de las algas comunes, presentan importantes aplicaciones y se descubren nuevas especies cada poco tiempo. A partir de ellas se pueden obtener compuestos de alto valor añadido, siendo una de las utilidades más extendidas la producción de proteínas, que se utilizan como complementos alimenticios o formando parte de alimentos.
- **Fotobiorreactores.** A diferencia de los estanques, los fotobiorreactores son sistemas cerrados. Pueden presentar diferentes configuraciones: tuberías, placas, depósitos o cúpulas hemisféricas. Todas ellas tienen en común que sus superficies de cierre son transparentes ya que el principal factor que afecta a su diseño es la penetración de luz.
- **Biogás.** El biogás es una mezcla de gases producido por una fuente natural, se produce mediante un proceso metabólico de descomposición de la materia orgánica sin la presencia del oxígeno.
- **CO₂ (dióxido de carbono).** El CO₂ también denominado anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante y normalmente se encuentra en la naturaleza en forma gaseosa, pero cuando se le somete a una presión

y temperatura considerable baja se vuelve líquido y llega a ser sólido formando lo que se denomina hielo seco o nieve carbónica.

- **Ácido sulfhídrico (H₂S).** Ácido sulfhídrico, también conocido como “sulfuro de hidrógeno” es un ácido hidrácido que presenta una fórmula molecular (H₂S aq) y se encuentra en la naturaleza en diferentes formas. En forma de H₂S se encuentra de manera gaseosa y dicho gas es más denso que el aire, es incoloro, muy tóxico odorífero e inflamable. Es un gas incoloro con un olor distintivo a huevo podrido. La percepción del olor del H₂S varía dentro de la población humana, en un rango de 0,008 – 0,2 ppm (Amoore, 1983 & Beauchamp, 1984).
- **Depuración.** Es un vocabulario se refiere como la acción y resultado de depurar o depurarse, en purificar, purgar, limpiar, refinar o refinar, en rehabilitar el desempeño del cargo o expulsar de una colectividad, corporación.
- **Los biofiltros.** También denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico.

CAPITULO III. METODOLOGIA

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación fue experimental con un diseño completo al azar simple donde se cuantificó la capacidad de absorción de gases contaminantes como el CO₂, mediante el tratamiento biológico con la MA *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890, determinando su eficiencia para absorber gases contaminantes en los fotobiorreactores. Además, estas MA son microorganismos fotoautótrofos, ya que tienen a la luz solar como su principal fuente de energía y el dióxido de carbono (CO₂) como su principal fuente de carbono (Martin, 2010).

El biogás producido por la empresa NEGASUS EIRL, provino de un biodigestor de capacidad de 10 m³ entre efluente y biogás, que por descomposición anaeróbica produce aproximadamente 7 m³ de biogás diario y almacena en un gasómetro de 2 m³ de capacidad. Para purificar el biogás se establecieron tres tratamientos y un piloto/testigo, distribuidos y contenidos de la siguiente manera: T₀ (0% de MA y 60 L H₂O y 0 mL Biol); T₁: (10% MA, 60 L H₂O y 50 mL Biol); T₂: (30% MA, 60 L H₂O y 100 mL Biol); T₃: (60% MA, 60 L H₂O y 150 mL Biol) utilizando como muestra total 1,08 m³ de biogás.

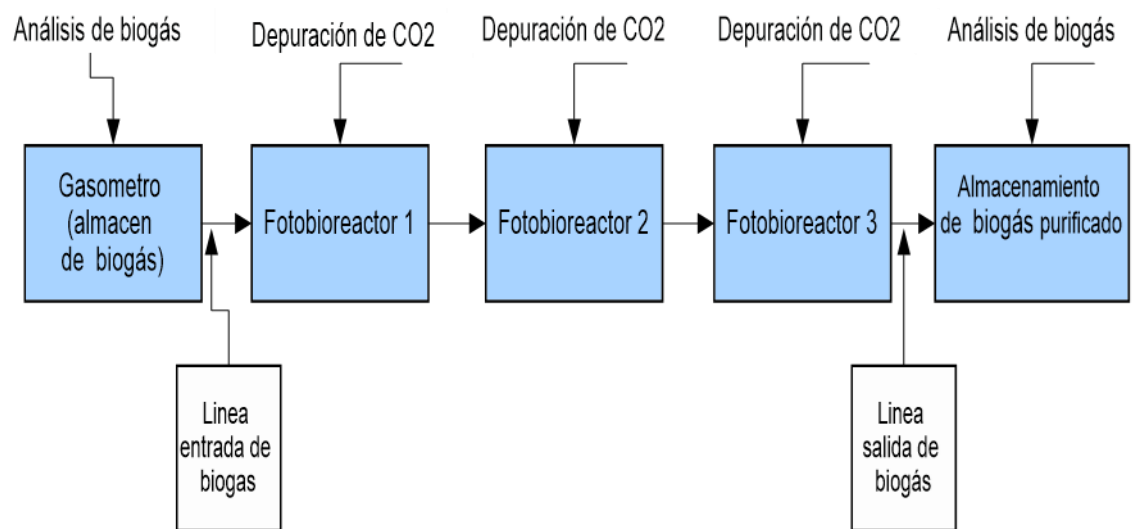
Los procesos de la purificación del biogás proceden desde un almacenamiento, una cámara de polietileno (gasómetro), donde el biogás obtenido de la descomposición anaeróbica de los efluentes de la planta extractora de palma aceitera. Por el tubo de redirección se llevaron a los burbujeadores que se encuentran en la parte inferior del Fotobiorreactor compuesto por vidrios resistentes a variaciones de presiones y a

temperatura solar, el cual tienen las dimensiones de 1 metro de largo, 0,1 metros de ancho y 0,6 metros de alto, en formas horizontales expuesto a la luz solar, donde en ello se cultivará las microalgas y lo cual depurará de forma biológica al CO₂.

El segundo y tercer fotobiorreactor es el reforzamiento y el tiempo de retención del biogás, que interactúo más con las microalgas y fijo CO₂, está compuesto por vidrios resistentes a variaciones de presiones y a temperatura solar, en la parte última del proceso se instaló un gasómetro de almacenamiento de biogás purificado (biometano), en ello se tomaran las muestras respectivas de purificado.

Figura 3.

Procesos de purificación del biogás



3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA

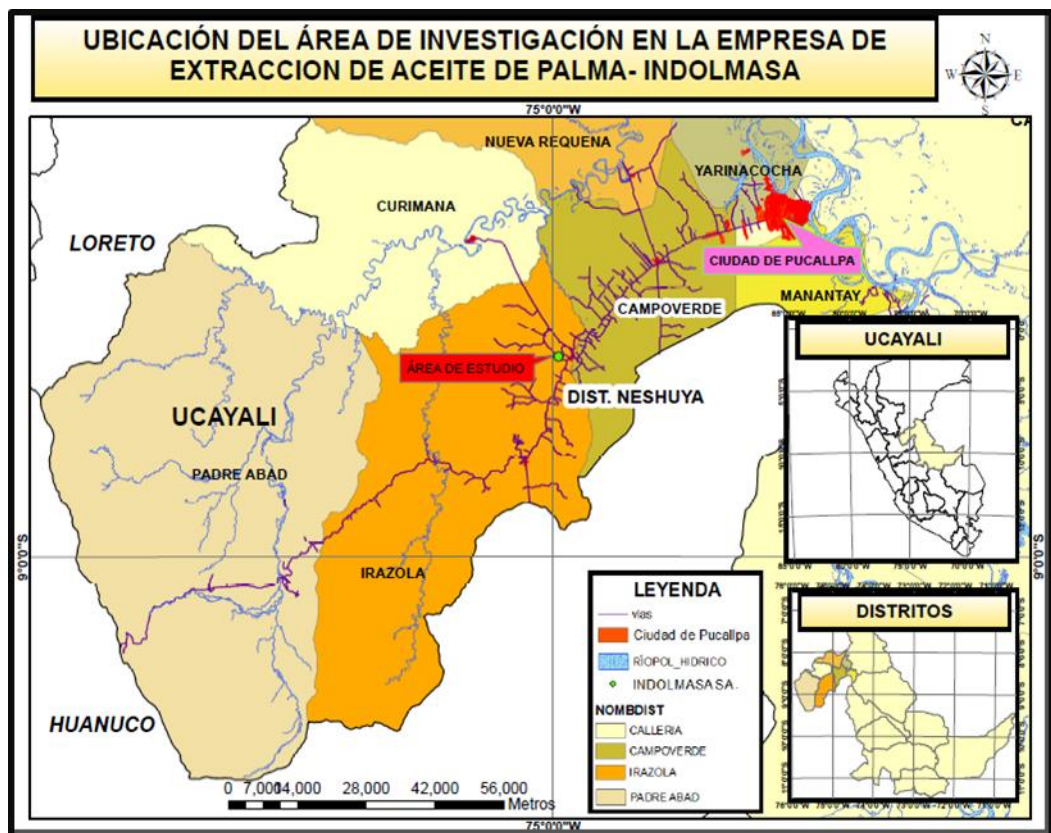
3.2.1. Ubicación

La evaluación experimental se realizó de octubre a diciembre del 2019, en ambientes de la Empresa INDOLMASA (8°38'58,46" S y 74°58'34,63" O), Distrito de Neshuya,

departamento de Ucayali, Perú, con clima predominantemente tropical cálido y húmedo, temperatura media anual de 25°C, máxima de 35°C, precipitaciones variables entre 1,3 y 3 mm. Presenta dos temporadas definidas al año: clima caluroso entre los meses de noviembre a abril que alcanzan temperaturas de hasta 40°C bajo sombra, y clima invernal con precipitaciones torrenciales desde octubre a marzo, época en la que se alcanza hasta 70% de humedad, con vientos de hasta 120 Km·h⁻¹ (Figura 4).

Figura 4.

Mapa de ubicación del área de investigación



3.2.2. Población

La población está constituida por biogás que produce la empresa NEGASUS EIRL en convenio con la Universidad Nacional

de Ucayali (UNU), proveniente de un biodigestor de capacidad de 10 m³ entre efluente y biogás, por la descomposición anaeróbica se produce aproximadamente 7 m³ de biogás diarias y es almacenada en un gasómetro de capacidad de 2 m³ y la diferencia es quemada directamente para reducir a la contaminación directa a la atmósfera. Se empleará un tratamiento biológico con microalgas del género *Chlorella vulgaris* SP para purificar el biogás producido de lodos procedentes del proceso de producción de aceite de palma, ubicados en la Carretera Federico Basadre Km. 62, INDOLMASA.

3.2.3. Muestra

La muestra es probabilística con un diagrama completamente al azar simple, para purificar dicho biogás, existió tres tratamientos y un piloto; T₀, T₁, T₂, T₃, y todo el tratamiento tomará un muestral de 1,08 m³ de biogás.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas

Para conocer los límites de significancia, Utilizaremos el Diseño Completamente al Azar (DCA) que involucra tres medidas de tratamiento con microalgas y 3 réplicas por cada tratamiento para evaluar.

Se empleó fichas técnicas para la recolección de datos de todos los experimentos que se realizó por cada tratamiento planteado. También se obtuvo fichas de registros para el almacenamiento de las muestras recogidas para sus próximos

envíos a laboratorios especializada para su análisis respectivo. Los resultados son sometidos a las pruebas estadísticas de Tukey, los que fueron analizados de acuerdo a los resultados encontrados y discutidos con otros resultados similares.

3.3.2. Instrumentos

3.3.2.1. *Materiales*

- Accesorio de PVC para filtro.
- Codos
- Tapones
- Manguera
- Mallas
- Conectores
- Accesorios eléctricos
- Cables
- Fusibles
- Tubos
- Tomacorriente
- Interruptor termomagnético
- Interruptor
- Tubos delgados de vidrio
- Burbujeador
- Balón de gas 5kg
- Vidrio de 4 mm
- Cámara de polietileno

3.3.2.2. Equipos

- Multiparámetro para aguas industriales
- Cronómetro digital
- Sensor de gases (H₂S, CO₂, CH₄) portátil
- Fluviómetro de gases
- Termómetro Original con Peachimetro

3.3.2.3. Insumos

- Microalgas (*Chlorella vulgaris* SP)
- Agua residual
- Biol
- Biogás

3.4. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Antes de la evaluación

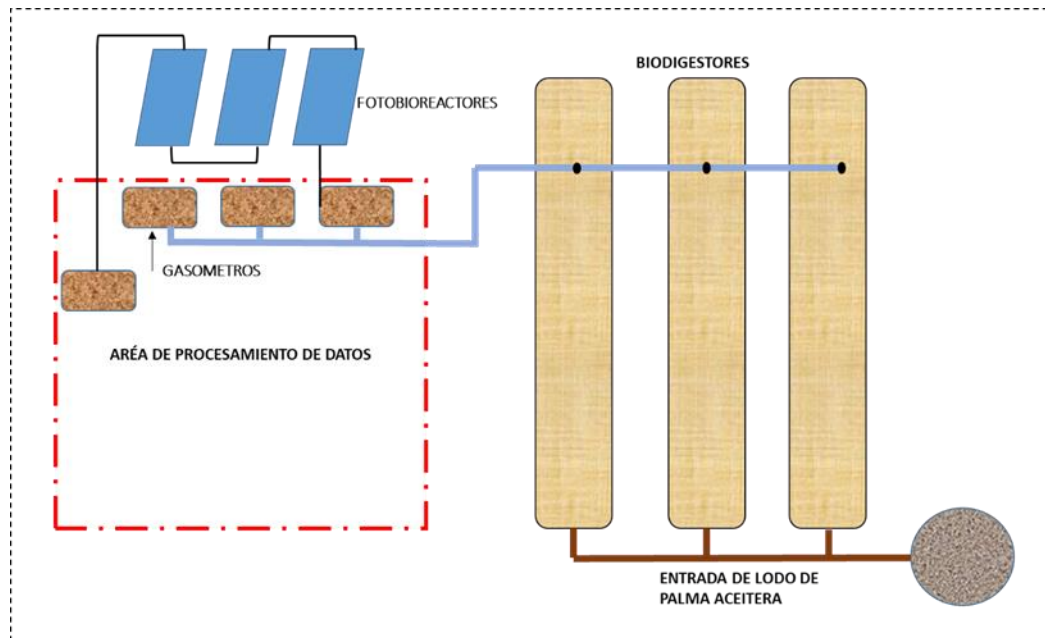
3.4.1.1. Selección del lugar de instalación del circuito

En la fase previa se seleccionó el lugar para instalación del circuito donde la empresa NEGASUS EIRL en colaboración con la Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Perú y la empresa INDOLMASA, producirían biogás por descomposición anaeróbica de lodos de una planta extractora de palma aceitera. El área donde se instaló los Fotobiorreactores para “purificar” dicho gas, fue muy cuidadosamente seleccionada para la protección de los factores ambientales como lluvias, radiación y vientos fuertes. Fue necesario realizar una limpieza y el acondicionamiento del área para instalar el circuito para el

tratamiento biológico, previo a la instalación de los materiales y equipos.

Figura 5.

Área de trabajo



3.4.1.2. Diseño e instalación del proceso experimental

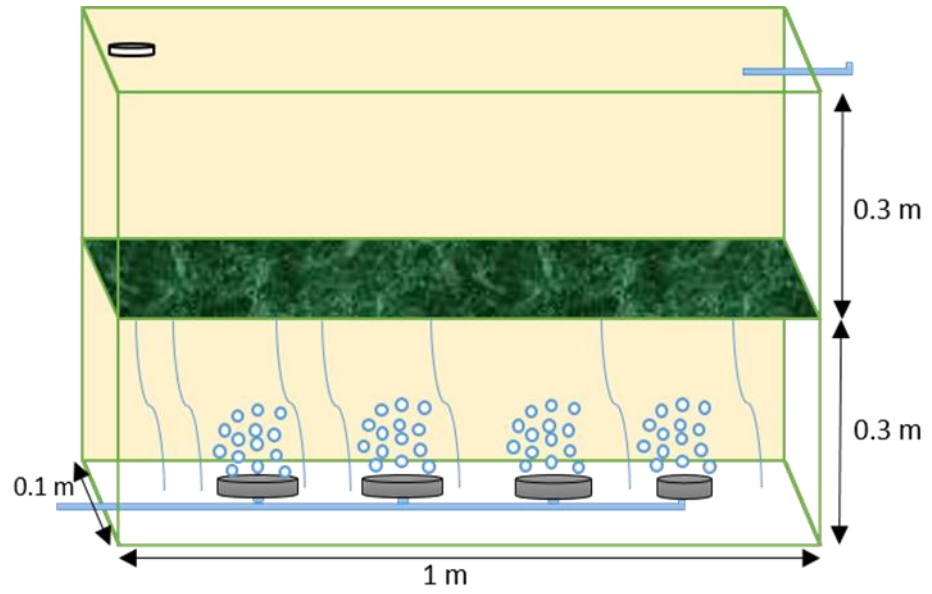
Para la segunda fase, se diseñaron los prototipos fijadores de CO_2 y H_2S utilizando los Fotobiorreactores tipo NPBR (“novel-designed photobioreactor”) transparente que se desarrollan en paneles planos de vidrio delgados con una alta relación del área de superficie por volumen, y está equipado con microburbujas y retención de deflectores, lo que garantiza una luz efectiva utilizando CO_2 (Cheah et al., 2020). El sistema cerrado tiene una mayor eficiencia en la utilización y fijación de CO_2 inyectado, dependiendo su forma y diseño, y permite una alta densidad de MA (González-Céspedes, 2016). Se

utilizó el Fotobiorreactor tipo NPBR (sistema cerrado) debido a que en el cultivo de MA presenta mayores ventajas que los sistemas abiertos, con una menor contaminación, mayor control de las condiciones de operación y menor inversión en la construcción (Benavente-Valdés et al., 2012).

La obtención de biometano a partir del biogás contenido en las cámaras de polietileno (gasómetros), ha registrado las características físicas y químicas con sensores de CO₂, H₂S, CH₄ y otros gases. El Fotobiorreactor fue construido con vidrios resistentes a variaciones de presiones y temperatura con formas horizontales expuesto a luz solar, donde se cultivaron las MA encargadas de la depuración biológica del CO₂, donde por el tubo de redirección fluyó el biogás hacia los burbujeadores en la parte inferior del Fotobiorreactor en el cual por gravedad las pequeñas burbujas ascendían, interactuando con las MA.

Figura 6.

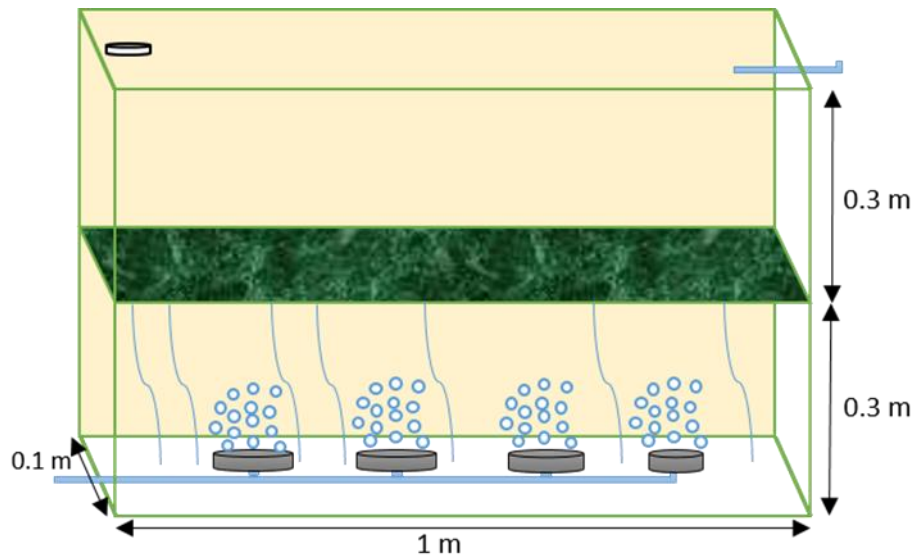
Fotobiorreactor número 1



El segundo Fotobiorreactor del mismo material, ha sido diseñado para reforzamiento y el tiempo de retención del biogás y su interacción con las MA para fijar CO_2 .

Figura 7.

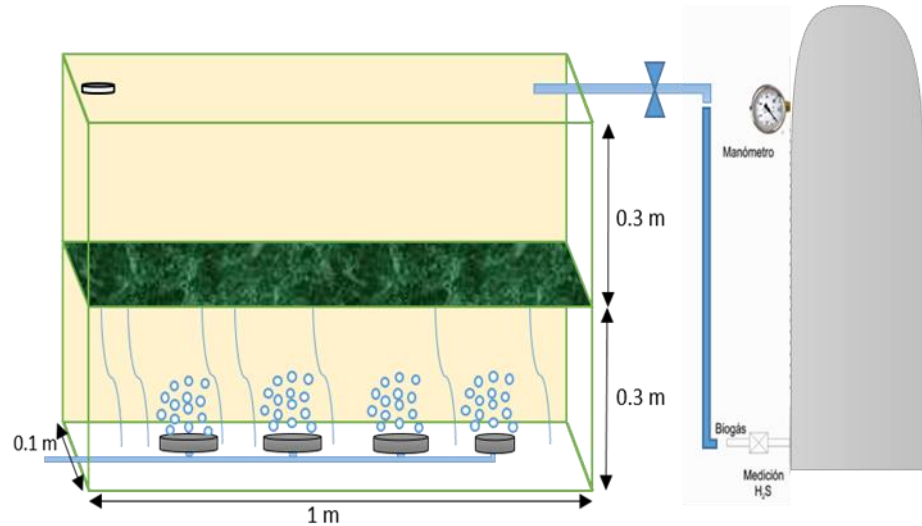
Fotobiorreactor número 2.



Finalmente, se instaló un gasómetro para almacenamiento del biogás purificado (biometano).

Figura 8.

Fotobiorreactor número 3 y almacenamiento del biometano



3.4.2. Durante la evaluación

La siguiente actividad fue la evaluación después de abastecer al Fotobiorreactor con 60 L de aguas residuales urbanas colectadas en la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Coronel Portillo- EMAPACOPSA, Pucallpa, Perú. Posteriormente se le agregó el Biol que se obtuvo del biodigestor, producto líquido que queda de la digestión anaerobia y es un fertilizante que contiene nitrógeno, fósforo, potasio y 85% de materia orgánica con un pH de 7,5. De esta forma se garantiza que el flujo de agua contenga los nutrientes necesarios para el metabolismo de las MA (Herrero, 2008).

Se agregó la MA *C. vulgaris* en cada Fotobiorreactor con una población estimada de $4,8 \times 10^7$ cel·mL⁻¹. Las MA fueron proporcionadas inicialmente por el IMARPE (Instituto del mar del Perú) de Lima, Perú, y fueron cultivadas en el medio de cultivo CHU-10 en un volumen de 20 L. *Chlorella vulgaris* SP, la MA se codificó como IMP- BG-074. Se diluyó en el flujo de agua, en las proporciones siguientes: testigo T₀ (0 L de MA y 60 L de flujo de agua); T₁ (1,1 L MA, 60 L de flujo de agua y 50 mL Biol), T₂ (3,3 L MA, 60 L flujo de agua y 100 mL Biol) y el T₃ (6,6 MA, 60 L flujo de agua y 150 mL Biol) (Tabla 3).

Tabla 3.

Tratamiento del biogás y sus réplicas

T ₀ = 0	T ₁ = 3,3 L	T ₂ = 9,9 L	T ₃ = 19,8 L
	T ₁ R ₁ =1,1 L	T ₂ R ₁ =3,3 L	T ₃ R ₁ = 6,6 L
	T ₁ R ₂ =1,1 L	T ₂ R ₂ =3,3 L	T ₃ R ₂ = 6,6 L
	T ₁ R ₃ =1,1 L	T ₂ R ₃ =3,3 L	T ₃ R ₃ = 6,6 L

Nota: T= tratamientos y R = réplicas

Por la parte inferior del Fotobiorreactor se alimentó el biogás en promedio con CH₄ (60,4%), H₂S (0,5%) y CO₂ (39,6%), afirman (Mann et al., 2009; Sialve et al. 2009; Doušková et al., 2010; Rawat et al., 2011; Kao et al., 2012; Lloja-Melendez, 2018). Al pasar por la columna horizontal, los compuestos no deseados (CO₂ y H₂S) se absorbieron en el medio líquido y posteriormente recirculan al Fotobiorreactor donde se eliminan mediante la actividad biológica de las MA. El CO₂ que se absorbe en la columna horizontal es utilizado para la actividad fotosintética, transformándose en

carbonatos capaces también de ser asimilados por las MA para su metabolismo.

3.4.3. Después de la evaluación

Se ha realizado un análisis de los datos adquiridos en el proceso de experimentación, así como también se realizó comparación con los resultados de otros autores que desarrollaron un tratamiento similar para la purificación del biogás.

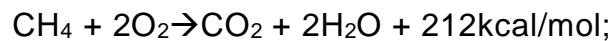
3.4.3.1. Análisis en laboratorio e instrumentos de campo

Se analizaron en laboratorio, a la entrada y a la salida del Fotobiorreactor con una diferencia de 80 min las siguientes variables físico-químicas: pH (método SM4500-H+ B) (entrada = 7,62; salida = 7,59; porcentaje de remoción de 0,39%), los sólidos suspendidos totales (SST) ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (método SM 2540 D) (entrada = 252; salida = 243; porcentaje de remoción de 3,57%), aceites de grasa ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (método EPA 1664 B) (entrada = 284; salida = 280; porcentaje de remoción de 1,41%), Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO) ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (método SM 5210 B) (entrada = 823; salida = 628; porcentaje de remoción de 23,69%), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (método SM 5220 D) (entrada = 2125; salida = 1228; porcentaje de remoción de 42,21 %), y coliformes termotolerantes (CT) ($\text{NMP}\cdot 100\text{ mL}^{-1}$) (método SM 9221 B) (entrada = 1,2·10²; salida = 1,1·10²; porcentaje de remoción de 8,33%) (Varnero et al., 2012). El Potencial

energético del biometano obtenido de la purificación del tratamiento biológico del biogás, denominado el poder calorífico, fue calculado siguiendo el método utilizado por Quesada et al. (2007).

3.4.3.2. Potencial energético del biometano obtenido de la purificación del tratamiento químico y biológico, del biogás

Para el cálculo del poder calorífico teórico, se optó por el método de acuerdo a Quesada, Salas, Arguedas, & Botero (2007a), el poder calorífico del biogás, obtenido de la digestión anaerobia de los efluentes de planta extractora de palma de aceite, se presenta de acuerdo a la siguiente reacción:



$$1\text{mol} = 22,4 \text{ L}, 1 \text{ m}^3 = 100\text{L}$$

Donde 1m^3 es igual a 44,64 mol

Por lo tanto, se utilizó y relaciono este valor con las concentraciones de metano medido en cada tratamiento.

3.5. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se empleó el ANOVA (análisis de varianza) y la prueba de tukey para determinar si existen diferencias significativas entre los T₀ al T₃ para CO₂, H₂S, CH₄ y el poder calorífico en el biogás. Se calculó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilks y la homogeneidad de las varianzas con la prueba de Levene. Se usó un valor de significancia de alfa=0,05. El paquete estadístico SPSS versión 25,0 fue empleado para el cálculo de los estadígrafos descriptivos e inferenciales.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

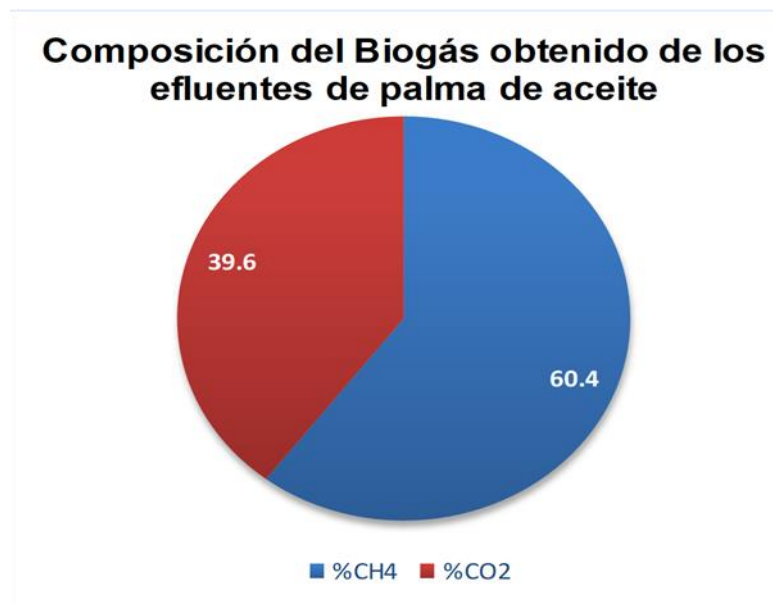
4.1. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEPURADA DE LAS MICROALGAS

4.1.1. Composición volumétrica del biogás

La concentración inicial del biogás con el cual se trabajó, fue: 60,4 % de CH₄, 39,6 % CO₂ y 32 ppm de H₂S, obtenido de la descomposición anaeróbica de lodos del efluente de la Planta extractora de aceite de palma INDOLMASA.

Figura 9.

Composición porcentual de biogás



4.1.2. Depuración de CO₂ y H₂S por tratamiento biológico

Dióxido de carbono (CO₂), absorbido mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris SP*) en la obtención de biometano a partir del biogás, generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMALSA. Concreta que la concentración de biogás mostrada en la siguiente Tabla 4 de datos de la composición del biogás purificado con cada tratamiento biológico aplicado, en el testigo se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4.

Concentración de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y un testigo.

GAS	CO ₂ %	H ₂ S ppm
T ₀ -MA-0%	32	60
T ₁ -MA-10%	32	47
T ₂ -MA-30%	26	42
T ₃ -MA-60%	39	48

El testigo de la prueba con 60 L de agua y el T₁ (1,1L de microalgas, 60L de agua y 50ml de biol) generaron un 32% de CO₂ en el biogás obtenido, para el T₂ (3,3L microalgas, 60L de agua y 100ml de biol) generó una concentración de 26% de CO₂ y 39% de CO₂ para el T₃ (6,6L microalgas, 60L de agua y 150ml biol).

Tabla 5.

Prueba de Anova para la concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y testigo

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	294,037	3	98,012	129,961	0,000
Dentro de grupos	6,033	8	0,754		
Total	300,070	11			

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias de la concentración de dióxido de carbono, obtenido para los tratamientos de 1,1 L de microalgas; 3,6 L de microalgas y 6,6 L de microalgas y testigo sin microalgas.

Tabla 6.

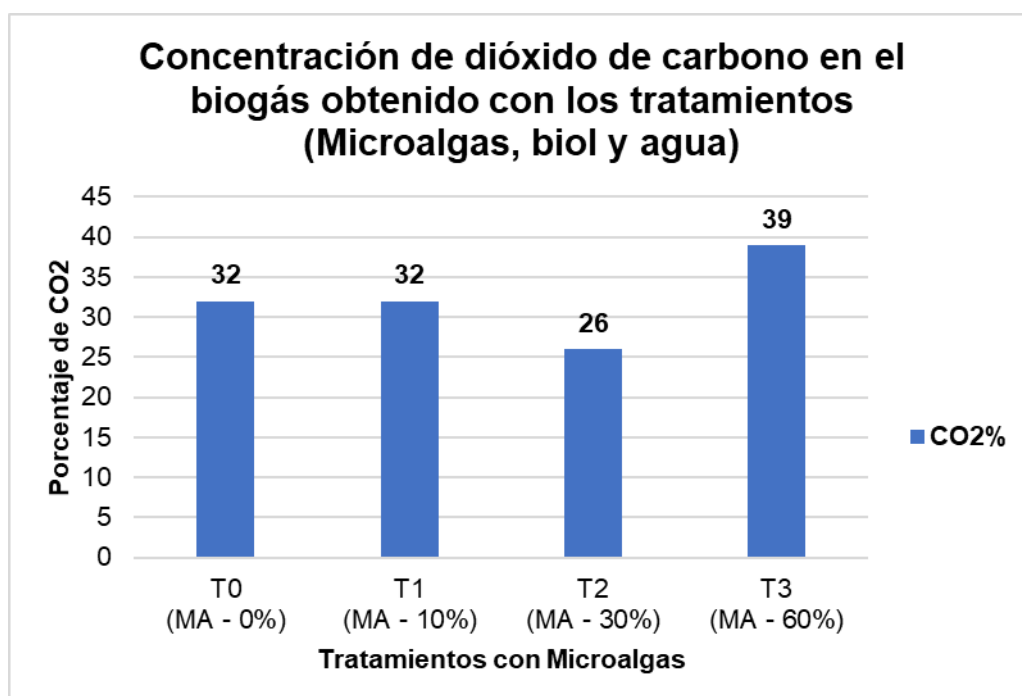
Prueba de Tukey HSD para la concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (microalgas, biol y agua) y testigo

Tratamientos con Microalgas	N	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
T ₂ : 30% MA, 60L H ₂ O y 100 ml Biol	3	25,5		
T ₁ : 10% MA, 60L H ₂ O y 50ml Biol	3		32,4	
T ₀ : 0% MA y 60 L H ₂ O y 0ml Biol	3		32,4	
T ₃ : 60%MA, 60L H ₂ O y 150 ml Biol	3			39,5
Sig.		1,0	1,0	1,0

La prueba de Tukey HSD muestra que la menor concentración de dióxido de carbono fue obtenida para el Tratamiento 2 (3,3 L microalgas, 60L de agua y 100ml biol), seguido por el Tratamiento 1 (1,1 L microalgas, 60L de agua y 50ml biol), Tratamiento 0 (60L de agua) y el Tratamiento 3 (6,6 microalgas, 60L de agua y 150ml biol) que menos eficiencia tuvo.

Figura 10.

Concentración de dióxido de carbono en el biogás obtenido con los tratamientos (Microalgas, biol y agua)



4.1.3. Concentración de CO₂ en el biogás

La menor concentración de dióxido de carbono en el biogás hace referencia a un mejor potencial de biogás, la Figura 10 muestra que el mejor tratamiento fue el T₂ con 26% de dióxido de

carbono, T₀ y T₁ con una concentración de 32% de dióxido de carbono y 39% de dióxido de carbono para el T₃.

4.1.4. Concentración de metano con el tratamiento biológico

Tabla 7.

Concentración de metano en el biogás obtenido con el tratamiento (microalgas, biol y agua) y un testigo.

GAS	CH ₄ %
T ₀ -MA-0%	68
T ₁ -MA-10%	68
T ₂ -MA-30%	74
T ₃ -MA-60%	61

El testigo de la prueba con 60 L de agua y el T₁ (1,1L de microalgas, 60L de agua y 50ml de biol) generaron un 68% de metano en el biogás obtenido, para el T₂ (3,3 L microalgas, 60L de agua y 100ml de biol) generó una concentración de 74% de metano y 61% de metano para el T₃ (6,6L microalgas, 60L de agua y 150ml biol).

Tabla 8.

Prueba de Anova para la concentración de metano en el biogás obtenido con los tratamientos (microalga, biol y agua) y un testigo.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	294,037	3	98,012	129,961	0,000
Dentro de grupos	6,033	8	0,754		
Total	300,070	11			

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias de la concentración de metano, obtenido para los tratamientos de 1,1 L de microalgas, 3,6 L de microalgas y 6,6L de microalgas y testigo sin microalgas.

Tabla 9.

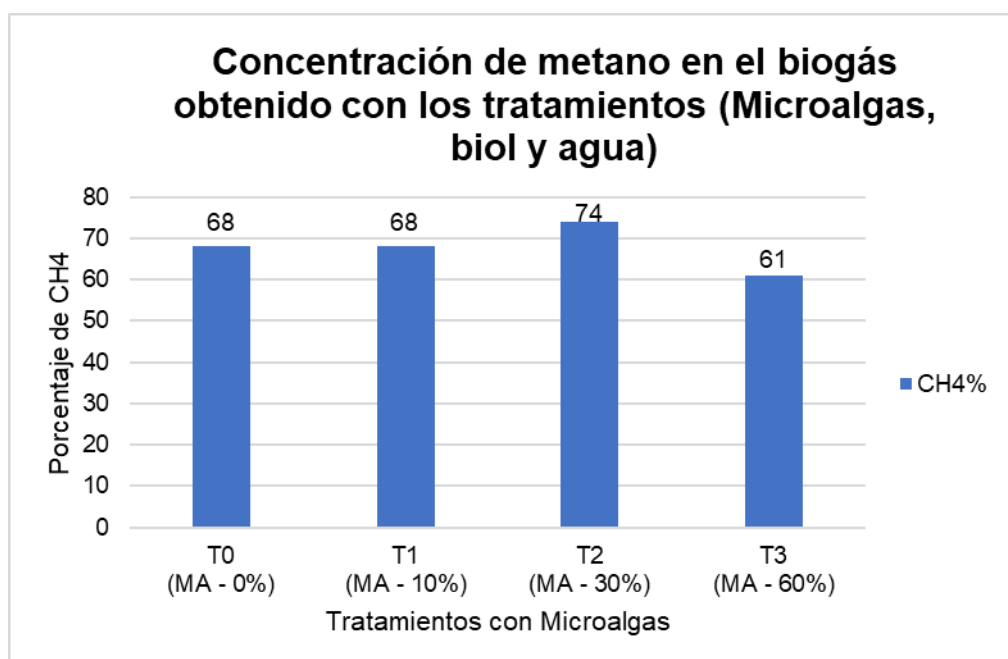
Prueba de Anova para la concentración de metano en el biogás obtenido con el tratamiento (microalga, biol y agua) y un testigo.

Tratamientos con Microalgas	N	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
T ₃ : 60%MA, 60L H ₂ O y 150 ml Biol	3	60,5		
T ₀ : 0% MA y 60 L H ₂ O y 0ml Biol	3		67,6	
T ₁ : 10% MA, 60L H ₂ O y 50ml Biol	3		67,6	
T ₂ : 30% MA, 60L H ₂ O y 100 ml Biol	3			74,5
Sig.		1,0	1,0	1,0

La prueba de Tukey HSD muestra que la mayor concentración de metano fue obtenida para el T₂ (3,3L microalgas, 60L de agua y 100ml biol), seguido por el T₁ (1,1 L microalgas, 60L de agua y 50ml biol) y el testigo (60L de agua), siendo el T₃ (6,6 microalgas, 60L de agua y 150ml biol) que menos eficiencia tuvo.

Figura 11.

Concentración de metano en el biogás obtenido con los tratamientos (Microalgas, biol y agua)



La mayor concentración de metano en el biogás hace referencia a un mejor potencial de biogás, la figura muestra que el mejor tratamiento fue el T₂ con 74% de metano, T₀ y T₁ con una concentración de 68% de metano y 61% de metano para el T₃.

4.1.5. Poder calorífico con el tratamiento biológico

Tabla 10.

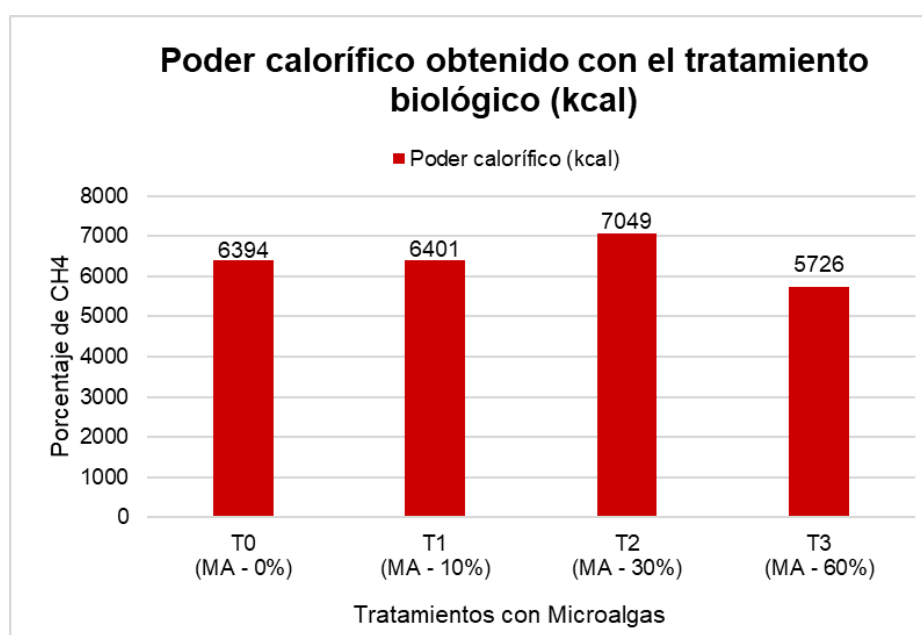
Poder calorífico del biogás purificado obtenido con el tratamiento químico.

Tratamiento	Concentración CH ₄ (%)	Poder calorífico (kcal)
T ₀ -MA-0%	68	6394
T ₁ -MA-10%	68	6401
T ₂ -MA-30%	74	7049
T ₃ -MA-60%	61	5726

Se muestra el poder calorífico con el testigo T₀ (60L agua) obteniendo el valor de 6394 kcal, el T₁ (1,1L microalgas, 60L de agua y 50ml de Biol) se obtuvo 6401 kcal, el T₂ (3,3L microalgas, 60L de agua y 100ml de Biol) se obtuvo 7049 kcal y el T₃ (6,6L microalgas, 60L de agua y 150ml de Biol) se obtuvo 5726 kcal.

Figura 12.

Poder calorífico obtenido con el tratamiento biológico



4.2. DISCUSIONES

Tabla 11.

Concentración de Dióxido de Carbono (CO₂), Ácido Sulfhídrico (H₂S), Metano (CH₄) y poder calorífico en el biogás obtenido en el testigo y en los tratamientos (T₁, T₂ y T₃)

Tratamien tos	CO ₂ %	H ₂ S ppm	CH ₄ %	Poder calorífico (kcal)
T ₀	32,43±0,31b	60,36±1,81a	67,56±0,30b	6394,33±29,02
T ₁	32,36±0,06b	46,63±0,87b	67,63±0,05b	6401,00±5,19
T ₂	25,50±1,70a	41,53±7,71b	74,50±1,70c	7050,33±161,29
T ₃	39,50±0,10c	48,33±0,57b	60,50±0,10a	5726,66±9,50
F	129,96	11,93	129,96	130,11
Sig	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: T₀: (0 L de microalgas (MA), 60 L de agua). T₁: (1,1.L MA, 60 L de agua y 50 mL biol). T₂: (3,3 L MA, 60 L de agua y 100 mL biol). T₃: (6,6 L MA, 60 L de agua y 150 mL biol). La prueba de Tukey a un nivel de alfa = 0,05 muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos cuando se presentan letras minúsculas diferentes.

La Tabla 11 muestra que el T₂ fue el tratamiento con mayor fijación de CO₂ y con mayor concentración de metano, reduciendo el H₂S, y con reducción al 13,6% la concentración de CO₂ del valor inicial del biogás. T₃, fue el más bajo en depurar CO₂. La mayor concentración de CH₄ en el biogás y el mayor poder calorífico fueron obtenidos con el T₂.

La ligera disminución del pH a la salida del Fotobiorreactor se experimenta debido a la formación de ácido carbónico debido al CO₂ (Ding et al., 2020). Jasni et al. (2020) y Srinuanpan et al. (2020) sostienen que, si el flujo de CO₂ es mayor que el consumo por las microalgas, se incrementa la acidez. Diversas investigaciones han remarcado el potencial de las MA en la eliminación de los nutrientes, lo que conduce a una reducción en las concentraciones de DQO y DBO (Mata et al., 2012; Al-Amshawee et al., 2020; Zabed et al., 2020).

Respecto a CO₂, la mayor depuración de este gas significa un mayor potencial del biogás, la que se refleja en el tratamiento T₂ con 25,5% de concentración de CO₂. Los resultados fueron similares a Han et al. (2012) quienes buscaron fijar el CO₂ con *C. vulgaris*; y a Ho et al. (2011) quienes encontraron una mayor tasa de fijación de CO₂ con *C. vulgaris*.

El principal objetivo al obtener el biogás es que presente CH₄ con una mayor concentración, y para ello debe eliminarse el CO₂. Una de las formas más fáciles es su absorción en agua donde quedan retenidas debido a las diferencias de polaridad entre ellas, mientras el CH₄ no se ve afectado, pues es bastante apolar. Es importante saber que la solubilidad del CO₂ en agua depende de la presión, de la temperatura y del pH (Carrillo, 2019).

Los macronutrientes son fundamentales para las MA, son medidos en g·L⁻¹ y tienen como propósito la síntesis de compuestos celulares que hacen parte de la configuración MA (Chisti, 2007). En nuestra investigación se utilizó como nutriente al Biol en volumen de 0,1 L

procedente del lodo de la planta extractora de aceite de palma. No fueron considerado los factores físicos y químicos del medio en solución, siendo estos muy importante para el trabajo eficiente de las MA (Qin, 2005; Shahid et al., 2019), debido a que dependen de éstos para la adecuada fijación de CO₂. Asimismo, debe tomarse en cuenta los parámetros físicos como intensidad lumínica, temperatura, pH y fotoperiodo porque pueden perjudicar el comportamiento de las MA. Estas variables son importantes desde el punto de vista técnico, medioambiental y social cuando se emplean membranas vítreas para purificar biogás, debido a que ofrecen ventajas para disminuir el contenido de H₂S presente en el biogás (Ortega-Viera et al., 2016).

La mayor Concentración de CH₄ fue obtenida con el tratamiento T₂ con 74,5%. Se ha utilizó tecnología de membranas para la eliminación de O₂ y N₂ durante el acondicionamiento de biogás en Fotobiorreactores de MA, encontrando concentraciones medias de 95,22% para el CH₄ (Domínguez, 2019). Nuestros resultados fueron ligeramente superiores a los registrados por González (2015) que, en su investigación sobre limpieza de biogás con MA, encontró una concentración de CH₄ por encima del 90% durante todo el proceso. Nuestros resultados muestran que el O₂ está por debajo de 0,5%, mientras que el N₂ y el CO₂ están en una proporción mayor pero también por debajo del 5%, lo que aumentaría la eficiencia del biogás. Respecto al H₂S es prácticamente nulo durante todo el proceso en el periodo de 0 a 10 días y de 10 a 60 días de evaluación respecto a la fijación de CO₂ y aumento de la concentración CH₄. Carrillo (2019) señala que el H₂S debe ser eliminado antes de ser

usado, debido a que uno de los productos de su combustión (SO_2) ocasiona causa lluvias ácidas.

López-Hernández et al. (2017) mencionan que, en el proceso de purificación biológica del biogás, las bacterias utilizan el CO_2 como fuente de carbono y en presencia de oxígeno son capaces de oxidar el sulfuro de hidrógeno, el sulfato y otros compuestos de azufre (Udaiyappan et al., 2020). Cortés- Castillo (2019) purificó biogás con microorganismos metanógenos hidrogenotróficos (Arqueas), y encontró un buen consumo de Hidrógeno y CO_2 , que favorecen la producción de CH_4 .

El mayor poder calorífico obtenido para el tratamiento biológico con MA fue de $7049 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-3}$, valores que muestran una mejora de la calidad del biogás y un tanto su acercamiento a biometano o GLN (gas natural comprimido) (Gutiérrez et al., 2012). Un biogás de calidad contiene entre 50 a 80% de gas CH_4 en su composición y un poder calorífico de 5000 a 6000 $\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}$, siendo nuestros resultados, ligeramente superiores a estos registros.

En la práctica el poder calorífico obtenido es teórico, mientras que el poder calorífico real se obtiene con pruebas directas en motores de combustión interna con entrada dual (biogás y gasolina). Cambero (2018) registró en motores de combustión interna un biogás con 53% de metano, con un poder calorífico real de $378,33 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-3}$ de biogás. Escobedo de León (2011), obtuvo un biogás como combustible alternativo en motores de combustión interna encendidos por chispa, el cual puede ser aprovechado para el funcionamiento de los motores de cuatro tiempos debido a que los motores de dos tiempos no se pueden adaptar a biogás. El combustible

debe ir mezclado con el aceite que lubrica las partes móviles del motor; mientras que el biogás purificado obtenido del tratamiento químico y biológico puede ser utilizado en la cocción de alimentos, en iluminación, y en la conversión a energía eléctrica o su uso como combustible en vehículos. Moreno (2014) recomienda que otro uso que se le puede dar al biogás, es la inyección a la red de gas natural o la conversión en GNC para su utilización en vehículos.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. El tratamiento biológico con MA para la remoción de CO₂, fue mejor en el T₂ de 3,3 L de MA, 60 L de agua y 100 mL de Biol, llegando a una concentración de 25,5% de CO₂. El T₂ fue el mejor al obtener los mejores valores de metano (74,5%).
2. El tratamiento biológico con microalgas para la remoción de dióxido de carbono (CO₂), manifestó un valor alto de remoción para el tratamiento 2 (3,3 L microalgas, 60L de agua y 100ml de Biol), que generó una concentración 26% de CO₂, siendo el que menor depuración de CO₂ tuvo fue el T₃ (6,6 L de microalgas, 60L de agua y 150ml de Biol).
3. El tratamiento biológico con microalgas manifiesta que la mayor concentración de CH₄ se obtiene con el T₂ (3,3 L microalgas, 60L de agua y 100ml de biol), cuyo valor es del 74% de CH₄, siendo el T₃ (6,6 L microalgas, 60L de agua y 150ml biol) el que menor eficiencia tiene con un valor del 61% de metano.
4. Por lo tanto, es posible concluir que la captura o depuración fotosintética del CO₂ del biogás, a través de un Fotobioreactor es un proceso factible y ambiental, a pesar de esto aún es necesario llevar los procedimientos a una escala mayor, con el fin de analizar el comportamiento de la depuración de CO₂, apuntando a una optimización de este en el cual permitirá generar un sistema viable y sustentable para la aplicación a un nivel industrial, logrando la generación de un biogás de calidad y aplicable como una alternativa para el gas de combustible. Se ha logrado que las microalgas en el proceso de purificación hacen como

segunda función purificar el agua residual utilizada para su desarrollo, regulando sus parámetros para hacer vertido directamente al caño natural.

5. El T₂ (de 3,3 L de MA, 60 L de agua y 100 mL de Biol,) generó mayor poder calorífico con 7049 kcal, puede ser utilizado en la cocción de alimentos o como combustible, gas comprimido para los motores de combustión interna de cuatro tiempos con garantías del alto poder calorífico sin riesgos de corrosión de las partes metálicas del equipo porque la concentración del H₂S está por debajo del límite permisible (50 ppm).

5.2. RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas con variaciones en agua u otras soluciones que aporten alimentos a las microalgas y promuevan el consumo del dióxido de carbono (CO₂).
2. Realizar simbiosis de microalgas con otros microorganismos para mejorar la eficiencia de remoción y garantizar su tiempo de vida útil de las microalgas como purificador del CO₂.
3. Considerar a una escala mayor con un flujo continuo y evaluando el tiempo de retención o interacción de las microalgas con el biogás para la optimización de esto, considerando factores meteorológicos de la zona.
4. La disposición final de las microalgas se dé adecuadamente con objetivos viables. En la actualidad las microalgas están siendo consideradas un mercado en auge y es posible que más adelante se instale otra ampliación en la investigación como biomasa, productos para alimentaciones pecuarias, en otros.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Engineering, A. 2020. Efluentes extracción aceites de palma africana. Obtenido de www.aqualimpia.com:

<https://www.aqualimpia.com/biodigestores/pome-palma-efluentes/>

Jasni, J.; Arisht, S.N.; Yasin, N.H.M.Y.; Abdul, P.M.; Lin, S.K.; Liu, C.M.; Wu, S.Y.; Jahim, J.M. & Takriff, M.S. 2020. Comparative toxicity effect of organic and inorganic substances in palm oil mill effluent (POME) using native microalgae species. *Journal of Water Process Engineering*, 34: Article 101165.

Shahid, A.; Malik, S.; Zhu, H.; Xu, J.; Nawaz, M.Z.; Nawaz, S.; Alam, M.A. & Mehmood, M.A. 2020. Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135303

Srinuanpam, S.; Cheirsilp, B. & Asyraf, M. 2020. Oleaginous microalgae cultivation for biogas upgrading and phytoremediation of wastewater. Chapter 5. En *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. Yousuf, A. (ed.). pp. 69 - 82. Elsevier B. V. ScienceDirect. London. UK.

Antonio, G. (1996). Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes. En G. Antonio, *DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES* (págs. 1-80). Lima-Peru: Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.

Guardado Chacón, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. CIUDAD DE LA HABANA-CUBA: Editorial CUBASOLAR.

Salazar, C. J. (2012). Evaluación de la eliminación de CO₂ y H₂S por endulzamiento de biogás usando soluciones acuosas de alcanolaminas. Tacna - Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN.

Soriano, M. R. (2019). Evaluación de la eficiencia de la Monoetanolamina en la reducción de CO₂ y H₂S en flujos de biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “INDUSTRIAS OLEAGINOSAS MONTE ALEGRE” S.A. (INDOLMASA), Noviembre-2018. Pucallpa: Universidad Nacional de Ucayali.

Al-Amshawee, S.K.; Yunus, M.Y. & Azoddein, AA. 2020. A review study of biofilm bacteria and microalgae bioremediation for palm oil mill effluent: possible approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 736: Article 022034.

Benavente-Valdés, R.; Montanez, J.; Aguilar, C.; Zavala, A. & Valdivia, B. 2012. Tecnología de cultivo de microalgas en Fotobiorreactores. Acta Química Mexicana, 4: 1-12.

Brar, A.; Kumar, M.; Singh, R.P.; Vivekanand, V. & Pareek, N. 2020. Phycoremediation coupled biomethane production employing sewage wastewater: Energy balance and feasibility analysis. Bioresource Technology, 308: Article 123292.

Cambero, M.R. 2018. Potencial de generación eléctrica con biogás a partir de efluente de la planta extractora de aceite de Palma INDOLMASA, Distrito de Neshuya, región Ucayali. Pucallpa, Perú. Para optar el grado de Magíster en Ciencias. Escuela de Posgrado Universidad Nacional de Ucayali, Perú.

Carrillo, J.M. 2019. Estudio básico del biogás y nuevas tecnologías para producirlo en la actualidad. Trabajo de fin de grado en Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Cartagena.

CE (Concorchem Envitech). 2020. Desulfuración del biogás mediante procesos biológicos: una alternativa eficiente, económica. y sostenible. Ingeniería Ambiental. Tratamiento de aguas residuales, Efluentes y Aire al Servicio del Medio Ambiente. En: [https://blog.condorchem.com/desulfuracion del biogás mediante procesos biológicos una alternativa eficiente económica y sostenible](https://blog.condorchem.com/desulfuracion-del-biogás-mediante-procesos-biológicos-una-alternativa-eficiente-económica-y-sostenible).

Cheah, Y.W.; Show, P.L.; Yap, Y.J.; Zaid, H.F.M.; Lam, M.K.; Lim, J.W.; Ho, Y.C. & Tao, Y. 2020. Enhancing microalga *Chlorella sorokiniana* CY-1 biomass and lipid production in palm oil mill effluent (POME) using novel-designed photobioreactor. *Bioengineered*, 11: 61-69.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294-306.

Cortés-Castillo, M. 2019. Purificación biológica de biogás por microorganismos metanógenos hidrogenotróficos. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. IPICYT. San Luis de Potosí. México.

Ding, G.T.; Yasin, N.H.M.; Takriff, M.S.; Kamarudin, K.F.; Salihon, J.; Yaakob, Z. & Hakimi, N.I.N.M. 2020. Phycoremediation of palm oil mill effluent (POME) and CO₂ fixation by locally isolated microalgae: *Chlorella sorokiniana* UKM2, *Coelastrella* sp. *Journal of Water Process Engineering*, 35: 101202.

Domínguez, C.L. 2019. Tecnología de membranas para la eliminación de O₂ y N₂ durante el acondicionamiento de biogás en fotobiorreactores de microalgas. Universidad de Valladolid. Máster en Ingeniería Ambiental. Valladolid. España.

Doušková, I.; Kaštánek, F.; Maléterová, Y.; Kaštánek, P.; Doucha, J. & Zachleder, V. 2010. Utilization of distillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: Biogas-cogeneration- microalgae-products. *Energy Conversion and Management*, 51: 606-611.

Elystia, S.; Muria, S.R. & Erlangga, H.F. 2020. Cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* as a raw material for the production of biofuels in palm oil mill effluent medium with the addition of urea and triple super phosphate. *Environmental Health Engineering and Management Journal* 2020, 7: 1–6.

Emparan, Q.; Jye, Y.S.; Danquah, M.K. & Harun, R. 2020. Cultivation of *Nannochloropsis* sp. microalgae in palm oil mill effluent (POME) media for phycoremediation and biomass production: Effect of microalgae cells with and without beads. *Journal of Water Process Engineering*, 33: Article 101043.

Escobedo de León, J.R. 2011. Biogas como combustible alternativo para una estufa y un motor de un cilindro ciclo Otto. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

González, Á. 2015. Limpieza de biogás en Fotobiorreactores de microalgas y bacterias. Grado de Ingeniería Química, Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid – España.

González-Céspedes, A. 2016. Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción. España. Fichas de Transferencia, Cajamar, Negocio Agroalimentario Cooperativo: 1-16.

Gutiérrez, G.; I. Mondaca; M. Meza; A. Félix; J. Balderas & P. Gortáres. 2012. Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía. *Ide@s CONCYTEG*, 7: 881-894.

Han, W. & Li, C., Miao, X. & Yu, G. 2012. A Novel miniature culture system to screen CO₂- sequestering microalgae. *Energies*, 5: 4372-4389.

Herrero, J. 2008. *Biodigestores Familiares, Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Bolivia: GTZ - Energía.

Ho, S.H.; Chen, C.Y.; Lee, D.J. & Chang, J.S. 2011. Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems- A review. *Biotechnology Advances*, 29: 189-198.

Kao, C.Y.; Chiu, S.Y.; Huang, T.T.; Dai, L.; Hsu, L.K. & Lin, C.S. 2012. Ability of a mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. *Applied Energy*, 93: 176-183.

Lloja-Meléndez, J.D. 2018. Calidad del biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma a nivel piloto en "industrias oleaginosas monte alegre" S.A. (INDOLMASA), Distrito de Neshuya, Departamento de Ucayali; noviembre del 2017. Tesis para título de ingeniero Ambiental. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa-Perú.

López-Hernández, J.E.; Ramírez-Higareda, B.L.; Gomes-Cabral, C.B. & Morgan-Sagastume, J.M. 2017. Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México. 1er Ed. Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México.

Mann, G.; Schlegel, M.; Schumann, R. & Sakalauskas, A. 2009. Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research*, 7: 33-38.

Martin, F. P. H. 2010. Optimization of photobioreactor for astaxanthin production in *Chlorella zofingiensis*. Master's Theses (Open). National University of Singapore.

Mata, T.; Melo, C.A.; Simões, M. & Caetano, N.S. 2012. Parametric study of a brewery effluent treatment by microalgae *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*, 107: 151-158.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2019. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2014. Lima-Peru. Ministerio del ambiente.

Moreno, B. 2014. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpia. Santa Fe, Argentina. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química.

Ortega- Viera, L.; Rodríguez- Muñoz, S.; Fernández-Santana, E.; Martínez-Ramírez, Y.; Crespo-Artigasa, A. & Viera-Gallardo, Y. 2016. Membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 55: 24-28.

Qin, J. 2005. Bio-hydrocarbons from algae: impacts of temperature, light and salinity on algae growth. A report for the Australian Rural Industries Research and Development Corporation. Rirdc. pp. 1-18.

Quesada, R.; Salas, N.; Arguedas, M. & Botero, R. 2007. Generación de energía eléctrica a partir de biogás. *Tierra tropical*, 3: 227-235.

Rawat, I.; Ranjith-Kumar, R.; Mutanda, T. & Bux, F. 2011. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88: 3411-3424.

Sialve, B.; Bernet, N. & Bernard, O. 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, 27: 409- 416.

Udaiyappan, A.F.M.; Hasan, H.A.; Takriff, M.S.; Abdullah, S.R.S.; Maeda, T.; Mustapha, N.A.; Yasin, N.H.M. & Hakimi, N.I.N.M. 2020. *Journal of Water Process Engineering*, 35: Article 101203.

Varnero, M.T.; Carú, M.; Galleguillos, K. & Achondo, P. 2012. Tecnologías disponibles para la purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23: 31-40.

Zabed, H.M.; Akter, S.; Yun, J.; Zhang, G.; Zhang, Y. & Qi, X. 2020. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117: Article 109503.

Abreu, A. P., B. Fernandes, A. A. Vicente, J. Teixeira, G. Dragone (2012). "Mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using industrial dairy waste as organic carbon source." *Bioresource technology* 118: 61-66.

Dragone, G., B. D. Fernandes, A. P. Abreu, A. A. Vicente, J. A. Teixeira (2011). "Nutrient limitation as a strategy for increasing starch accumulation in microalgae." *Applied Energy*

Serejo, M., Posadas, E., Boncz, M.A., Blanco, S., García-Encina, P. y Muñoz, R. (2015). "Influence of Biogas Flow Rate on Biomass Composition During the Optimization of Biogas Upgrading in Microalgal-Bacterial Processes". en ACS Publications. *Environmental, Science & Technology*.

Ación Fernández, F.G. (2015). "Curso Avanzado de Cultivo de Microalgas". Presentación: "Current and future commercial applications of microalgae.

Petterson, A. y Wellinger, A. (2009). "Biogas upgrading technology es development and innovation" en IEA Bioenergy.

Varnero, M.T., Carú, M., Galleguillos, K. y Achondo, P. (2012). "Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica".

Lizbeth A. Barajas, Emerson A Sierra (2017). Evaluación de procesos necesarios para captación y/o almacenamiento de CO₂ como una medida de reducción al impacto ambiental, 2017.

ABOUDHEIR A., T. P. (2003). "Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO₂-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions". En C. E. Science, Chemical Engineering Science (págs. 5195 – 5210).

Antonio, G. (1996). Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes. En G. Antonio, DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES (págs. 1-80). Lima-Peru: Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.

Brundick, W. (2010). Sulfatreat estimated performance sheet. Chesterfield, Missouri, USA: s.n.: Mi Swaco.

Carrillo, L. (2003). Microbiología Agrícola. Universidad Nacional de Salta, Argentina, ISBN 987-9381-16-5.

Cengel, Y., & Boles, A. (2008). Thermodynamics. An Engineering Approach. New York, USA: McGraw- Hill. doi: ISBN 9780073305370.: 6th edición.

Chakravarti, S. G. (2001). Advanced Technology for the Capture of Carbon Dioxide. Praxair Technology, Inc. Washington, DC: First National Conference on Carbon Sequestration.

Coto, J. M. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTG. Universidad EARTH.

ANEXOS

Anexo 1. Iconografía

Figura 13.

Producción de Biogás



Figura 14.

Almacenamiento de BIOGAS antes del tratamiento



Figura 15.

Obtención de cepas de microalgas chlorella vulgaris SP



Figura 16.

Solución de microalgas antes del tratamiento



Figura 17.

Fotobioreactor de purificación de biogás



Figura 18.

Agregado de Biol, como nutrientes para las microalgas



Figura 19.

Inyección de BIOGAS al Fotobiorreactor para el tratamiento.



Figura 20.

Lectura de gases del biogás purificada, salida del Fotobiorreactor.



Figura 21.

Almacenamiento de biogás purificado



Figura 22.

Recolección de muestra para prueba de quemado.



Figura 23.

Quema del biogás purificado (biometano)

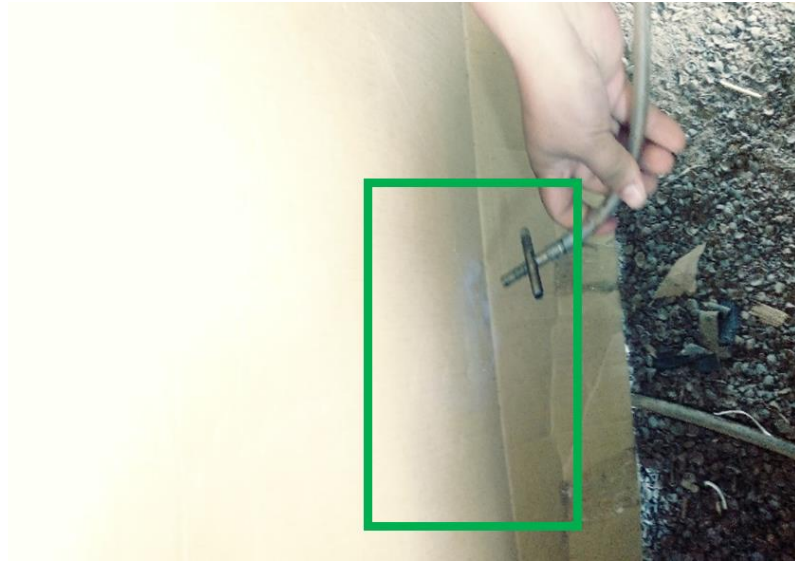


Figura 24.

Recolección de muestra para análisis de la composición de biogás purificado (biometano) en laboratorio.



Anexo 2. Resultados de laboratorio

Figura 25.

Resultado de análisis de biogás del laboratorio intertek, referencia laboratorio.

00045H/20 (C) tratamiento N° 2 Microalgas (chorella vulgaris).



Tel +511 3990940
www.intertek.com.pe

INFORME DE ENSAYO N° 00196H/20

ITS REF.: PER/13520-19

CLIENTE : Universidad Nacional de Ucayali
DIRECCION : CAR.FEDERICO BASADRE KM. REF: (KM. 6.001 UNU) UCAYALI - CORONEL PORTILLO - CALLERIA
DESCRIPCION DE LA MUESTRA (1) : BIOGÁS
INFORMACION DE LA MUESTRA IDENTIFICACION : TRATAMIENTO N° 1 "T1" QUIMICO; MUESTRA 1 (A)
 MUESTRA TESTIGO TO BIOGAS; MUESTRA N° 0 (B)
 TRATAMIENTO N° 2 "T2" MICROALGAS; MUESTRA 2 (C)
CANTIDAD : (3 x 1 bolsa tedlar) muestra
PRESENTACION : Bolsas Tedlar
PROCEDENCIA : Suministrado por el cliente
FECHA DE RECEPCION EN EL LAB. : 28 de Diciembre del 2019
FECHA DE ANALISIS : 08 de enero del 2020
REFERENCIA DEL LABORATORIO : 00043H/20 (A) 00044H/20 (B) 00045H/20 (C)
REFERENCIA DEL CLIENTE : Correo Electronico

METODOS / VERSION	ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS		
ASTM D 1945 / 14	Método Estandar para Analisis de Gas Natural por Cromatografia de Gases		(A)	(B)	(C)
	N2	% Mol	81.78	69.54	2.34
	C1	% Mol	14.89	26.76	96.70
	CO2	% Mol	3.34	3.61	0.96
	C2	% Mol	0.00	0.07	0.00
	C3	% Mol	0.00	0.00	0.00
	IC4	% Mol	0.00	0.00	0.00
	NC4	% Mol	0.00	0.00	0.00
	ICS	% Mol	0.00	0.00	0.00
	NC5	% Mol	0.00	0.01	0.00
	C6+	% Mol	0.00	0.00	0.00

(1) Según lo indicado por el cliente.

Ensayo Subcontrado, Referencia Informes N° 2020-01-001, 2020-01-002, 2020-01-003

Notas:

- Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación por escrito de INTERTEK TESTING SERVICES PERU S.A.
- Los resultados de los ensayos emitidos en el presente informe sólo son válidos para la muestra indicada no debiendo ser usados como una certificación de conformidad o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo brinda.

Lima, 20 de Enero del 2020.

ING. Ana Puentes Portocarrero
 SIGNATARIO AUTORIZADO
 Jefe de Laboratorio Caleb Brett
 C.I.P. 97381


Rev. 01 / May. 17

pagina 1 de 1
 FPER/036D/L



Figura 26.

Análisis fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio del cultivo de microalgas antes del tratamiento de biogás



Natura Analítica

Natura Analítica SAC
RUC: 20600103661

SECCIÓN II:
ANÁLISIS DE AGUAS Y ALIMENTOS

CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 20191127

SOLICITANTE	Universidad Nacional de Ucayali
RUC/DNI	20154598244
*MUESTRA	Efluente industrial
PROCEDENCIA	Planta extractora de Palma Aceitera – CFB Km 62.
CANTIDAD RECIBIDA	5 L aprox.
NORMA TECNICA	D.S. N° 031-2010 – Reglamento de Calidad del Agua Para el Consumo Humano.
ANALISTA RESPONSABLE	Bigo. Fredi Carrasco S. Bigo. Miguel Fabián F.
FECHA DE MUESTREO	14/11/2019
*COLECTOR	El Solicitante
ANÁLISIS SOLICITADOS	pH, "Aceites y Grasas", Solidos Suspendidos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Coliformes Totales.
FECHA INICIO DE ENSAYO	14/11/2019
FECHA TERMINO DE ENSAYO	22/11/2019
FECHA EMISION DE RESULTADOS	22/11/2019


*El laboratorio solo se hace responsable de la muestra a partir de su recepción

RESULTADOS

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO y MICROBIOLÓGICO

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
pH	---	SM 4500-H ⁺ B	7.59
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	SM 2540 D	243
ACEITES Y GRASAS	mg/L	EPA 1664 B	280
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	mg/L	SM 5210 B	628
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	mg/L	SM 5220 D	1228
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100mL	SM 9221 B	1,1 x 10 ²

MÉTODO: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Ed. 22 2012
 L.M.P. LIMITE MAXIMO PERMISIBLE POR LA NORMA EN MENCIÓN



Natura Analítica S.A.C.

Bigo Alcides E. Castillo Quezada

Laboratorio Clínico y Analítico Biológico
 CIP 5174 AEC 0136

1 de 1

av. Sáenz Peña 503 PUCALLPA teléfono: 576060 E-MAIL: naturaanalitica@gmail.com

Figura 27.

Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del cultivo de microalgas después del tratamiento de biogás



Natura Analítica SAC
RUC: 20600103661

SECCIÓN II:
ANÁLISIS DE AGUAS Y ALIMENTOS

CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 20191127

SOLICITANTE	Universidad Nacional de Ucayali
RUC/DNI	20154598244
*MUESTRA	Efluente industrial
PROCEDENCIA	Planta extractora de Palma Aceitera – CFB Km 62.
CANTIDAD RECIBIDA	5 L. aprox.
NORMA TECNICA	D.S. N° 031-2010 – Reglamento de Calidad del Agua Para el Consumo Humano.
ANALISTA RESPONSABLE	Bigo. Fredi Carrasco S. Bigo. Miguel Fabián F
FECHA DE MUESTREO	14/11/2019
*COLECTOR	El Solicitante
ANÁLISIS SOLICITADOS	pH, "Aceites y Grasas", Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Coliformes Totales.
FECHA INICIO DE ENSAYO	14/11/2019
FECHA TERMINO DE ENSAYO	22/11/2019
FECHA EMISION DE RESULTADOS	22/11/2019

*El laboratorio solo se hace responsable de la muestra a partir de su recepción

RESULTADOS

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO y MICROBIOLÓGICO

PARÁMETRO	UNIDADES *	MÉTODO	RESULTADO
pH	----	SM 4500-H* B	7,62
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	SM 2540 D	252
ACEITES Y GRASAS	mg/L	EPA 1664 B	284
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	mg/L	SM 5210 B	823
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	mg/L	SM 5220 D	2125
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100mL	SM 9221 B	1,2 x 10 ²

MÉTODO: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Ed. 22 2012
L.M.P. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE POR LA NORMA EN MENCIÓN



Natura Analítica S.A.C.
Bigo. Alcides E. Castillo Quezada
140 Laboratorio Clínico y Análisis Biológico
200 5172 ANE 0130

1 de 1

av. Sáenz Peña 503 PUCALLPA teléfono: 576060 E-MAIL: naturaanalitica@gmail.com

Anexo 3. Matriz de consistencia

EVALUACIÓN DE LA DEPURACIÓN DE CO ₂ Y H ₂ S Y LA CONCENTRACION DE CH ₄ , MEDIANTE EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON MICROALGAS (<i>Chlorella vulgaris SP</i>) PARA OBTENCIÓN DE BIOMETANO, A PARTIR DEL BIOGÁS GENERADO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE (INDOLMASA)"					
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	CRITERIOS DE MEDICIÓN
<p>GENERAL</p> <p>¿Habrà depuraci3n de CO₂ y H₂S, mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>), para la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA)?</p> <p>Específicos</p> <p>¿Qué Cantidad de CO₂ y H₂S se podrá depurar mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>), para la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA)?</p> <p>¿Cuánto será la concentraci3n de CH₄ obtenido mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>), para la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA)?</p> <p>¿Cuál es el potencial energético del Biometano obtenido de la purificaci3n mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris, SP</i>) en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA?</p>	<p>GENERAL</p> <p>Evaluar la Depuraci3n del CO₂ y H₂S, mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>) en la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA)".</p> <p>Específicos</p> <p>Cuantificar la cantidad de CO₂ y H₂S, depurada mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>) en la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA).</p> <p>Cuantificar la concentraci3n de CH₄ obtenido mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>) en la obtenci3n de biometano, a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA).</p> <p>Determinar el potencial energético del Biometano obtenido de la purificaci3n mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris, SP</i>) en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.</p>	<p>GENERAL</p> <p>El CO₂ y H₂S del biogàs será depurada a un 99.89% mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>), a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA)".</p> <p>Específicos</p> <p>El CO₂ y H₂S presente en el biometano será de un 0.1% mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>), a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA).</p> <p>La concentraci3n de CH₄ en el biometano, estarà presente a más del 90%, mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>) a partir del biogàs generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A (INDOLMASA).</p> <p>Se obtendrá potencial energético del Biometano obtenido de la purificaci3n mediante el tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris, SP</i>) en la Planta Extractora de Palma de Aceite (INDOLMASA)</p>	<p>DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fijaci3n de CO₂ - Fijaci3n de H₂S <p>INDEPENDIENTE</p> <p>Tratamiento biol3gico con microalgas (<i>Chlorella vulgaris SP.</i>)</p>	<p>DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Captaci3n de CO₂ - Captaci3n de H₂S <p>INDEPENDIENTE</p> <p>Incremento o porcentual de concentraci3n de CH₄</p>	<p>DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> MASA (Kg) Porcentual (%) PPM Volumen (m³) <p>INDEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> - %, ppm, kg - %, ppm, kg