



## The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

### BIOLOGICAL PURIFICATION OF BIOGAS FROM OIL PALM PLANT SLUDGE, USING MICROALGAE

### PURIFICACIÓN BIOLÓGICA DE BIOGAS PROCEDENTES DE LODOS DE PLANTA DE PALMA ACEITERA, UTILIZANDO MICROALGAS

Grober Panduro-Pisco<sup>1,2</sup>; Rubén Javier Calderon-Lujan<sup>1</sup>; Sayuri Julissa Herrera Chalco<sup>1</sup> & José Iannacone<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Ucayali. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Carretera Federico Basadre KM 6.2 Pucallpa, Ucayali, Perú.

<sup>2</sup> Negocios Amazónicos Sustentables, EIRL, NEGASUS EIRL, Área de proyectos. Av. Pachacútec Mz. 6 Lt. 17, Manantay, Ucayali, Perú.

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA), (EUPG), Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCCNM). Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.

<sup>4</sup> Laboratorio de Parasitología. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma (URP). Lima, Perú.  
joseiannacone@gmail.com

\*Corresponding author: ecologrober2012@hotmail.com

## ABSTRACT

Biogas with its composition of gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  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:  $T_0$  (0% MA and 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  and 0 mL Biol);  $T_1$ : (10% MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  and 50 mL Biol);  $T_2$ : (30% MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  and 100 mL Biol), and  $T_3$ : (60% MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  and 150 mL Biol) in which  $\text{CH}_4$  concentrations were measured. The results show a higher  $\text{CO}_2$  fixation in  $T_2$  with 26%  $\text{CO}_2$  concentration and 74% methane used in a continuous flow of 200 L of biogas.  $T_0$  and  $T_1$  with a concentration of 32% and 39% of  $\text{CO}_2$ , respectively. It is concluded that the biological treatment with MA for  $\text{CO}_2$  removal shows the highest removal value for  $T_2$ , reducing by 13.6% the  $\text{CO}_2$  concentration of the initial biogas value, and a lower  $\text{CO}_2$  clearance was observed in  $T_3$  treatment.

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

doi: 10.24039/rtb2020181539

## RESUMEN

El biogás con su composición de gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  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  $\text{H}_2\text{O}$  y 0 mL Biol);  $T_1$ : (10 % MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  y 50 mL Biol);  $T_2$ : (30 % MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  y 100 mL Biol), y  $T_3$ : (60 % MA, 60 L  $\text{H}_2\text{O}$  y 150 mL Biol) en los cuales se midieron las concentraciones de  $\text{CH}_4$ . Los resultados registran una mayor fijación de  $\text{CO}_2$  en el  $T_2$  con 26% de concentración de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , respectivamente. Se concluye que el tratamiento biológico con MA para la remoción del  $\text{CO}_2$ , muestra el valor más alto de remoción para el  $T_2$ , reduciendo en 13,6% la concentración de  $\text{CO}_2$  del valor inicial del biogás, y una menor depuración de  $\text{CO}_2$  se observó en el tratamiento  $T_3$ .

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

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático es más evidente debido a las constantes emisiones de GEI (Gases del Efecto Invernadero) [Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ )]. El informe del MINAM (2019) registra que el 75,2% de las emisiones corresponden a  $\text{CO}_2$ , el 15,1% a  $\text{CH}_4$  y el 9,6% a  $\text{N}_2\text{O}$ . El origen de las emisiones de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CH}_4$  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 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 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  $\text{CO}_2$  (Varnero *et al.*, 2012; Brar *et al.*, 2020). Las MA fotosintéticas, por su alta capacidad de captura y fijación de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $0,8 \text{ m}^3$  por t de racimo de fruta procesada, con una DQO entre  $65.000$  y  $120.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y una carga equivalente a aproximadamente  $50 \text{ kg}$  de DQO por t de fruto procesado. La  $\text{DBO}_5$  es de aproximadamente  $48.000 \text{ (mg}\cdot\text{L}^{-1})$  y grasas y aceites mayor de  $2.000 \text{ (mg}\cdot\text{L}^{-1})$ , y por cada  $\text{m}^3$  de efluentes procesados en un biodigestor se puede producir un promedio de  $30 \text{ m}^3$  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 biogas procedentes de lodos de planta de palma aceitera, utilizando MA.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó de octubre a noviembre del 2019, en ambientes de la Empresa INDOLMASA ( $8^{\circ}38'58,46'' \text{ S}$  y  $74^{\circ}58'34,63'' \text{ O}$ ), Distrito de Neshuya, departamento de Ucayali, Perú, con clima predominantemente tropical cálido y húmedo, temperatura media anual de  $25^{\circ}\text{C}$ , máxima de  $35^{\circ}\text{C}$ , precipitaciones variables entre  $1.300$  y  $3.000 \text{ mm}$ . Presenta dos temporadas definidas al año: clima caluroso entre los meses de noviembre a abril que alcanzan temperaturas de hasta  $40^{\circ}\text{C}$  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  $120 \text{ Km}\cdot\text{h}^{-1}$  (Figura 1).

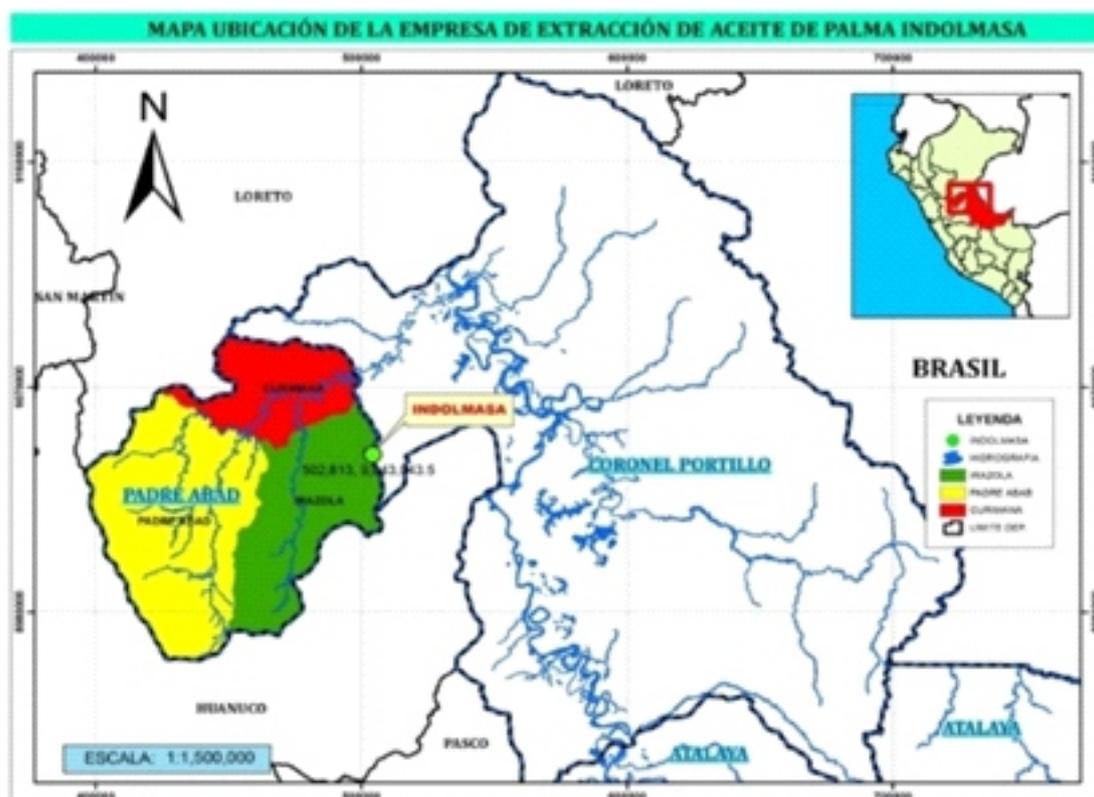


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La investigación fue experimental con un diseño completo al azar simple donde se cuantificó la capacidad de absorción de gases contaminantes como el  $\text{CO}_2$ , 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 ( $\text{CO}_2$ ) como su principal fuente de carbono (Martin, 2010).

El biogás producido por la empresa NEGASUS EIRL, provino de un biodigestor de capacidad de  $10 \text{ m}^3$  entre efluente y biogás, que por descomposición anaeróbica produce aproximadamente  $7 \text{ m}^3$  de biogás diario y almacena en un gasómetro de  $2 \text{ m}^3$  de capacidad. Para purificar el biogás se establecieron tres tratamientos y un piloto/testigo, distribuidos y contenidos de la siguiente manera:  $T_0$  (0 % de MA y  $60 \text{ L H}_2\text{O}$  y  $0 \text{ mL}$

Biol);  $T_1$ : (10 % MA,  $60 \text{ L H}_2\text{O}$  y  $50 \text{ mL Biol}$ );  $T_2$ : (30 % MA,  $60 \text{ L H}_2\text{O}$  y  $100 \text{ mL Biol}$ );  $T_3$ : (60 % MA,  $60 \text{ L H}_2\text{O}$  y  $150 \text{ mL Biol}$ ) utilizando como muestra total  $1,08 \text{ m}^3$  de biogás.

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), Lima, Perú y la empresa INDOLMASA SAC, 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.

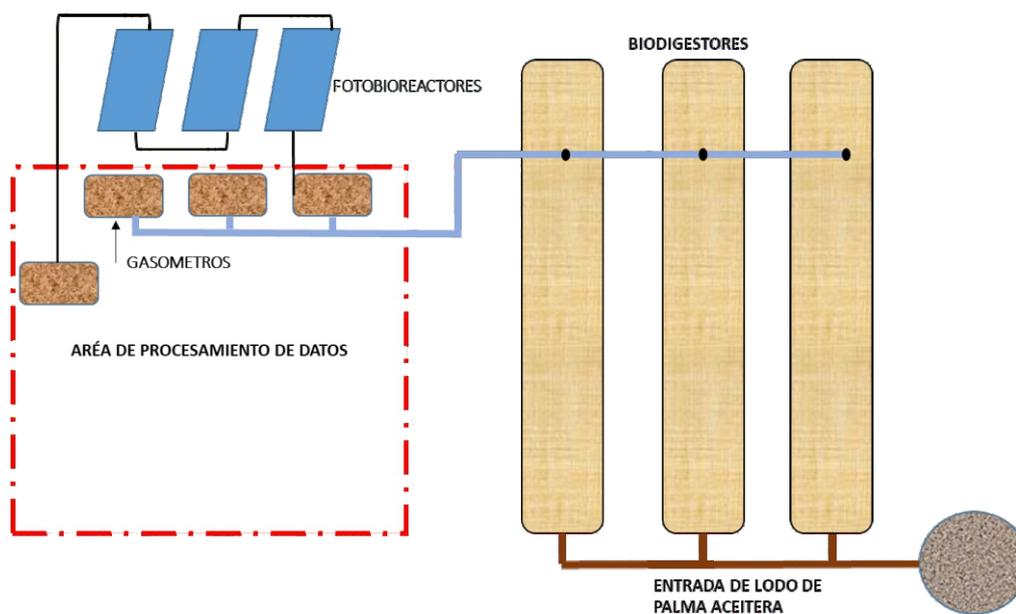


Figura 2. Área de trabajo.

Para la segunda fase, se diseñaron los prototipos fijadores de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , 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  $\text{CO}_2$  (Cheah *et al.*, 2020). El sistema cerrado tiene una mayor eficiencia en la utilización y fijación de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  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  $\text{CO}_2$ , 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.

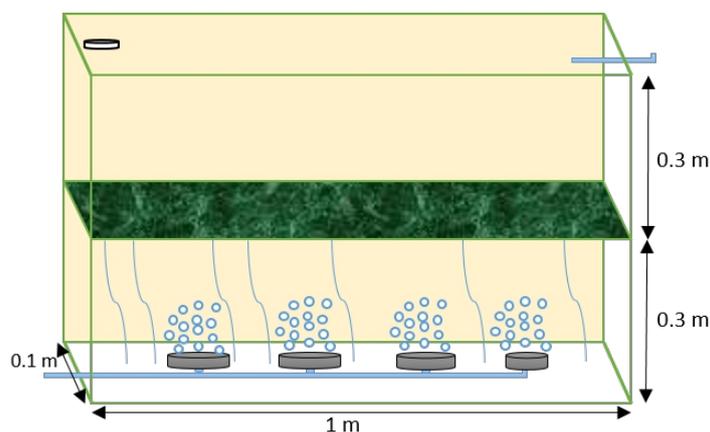


Figura 3. Fotobiorreactor Número 1.

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  $\text{CO}_2$ .

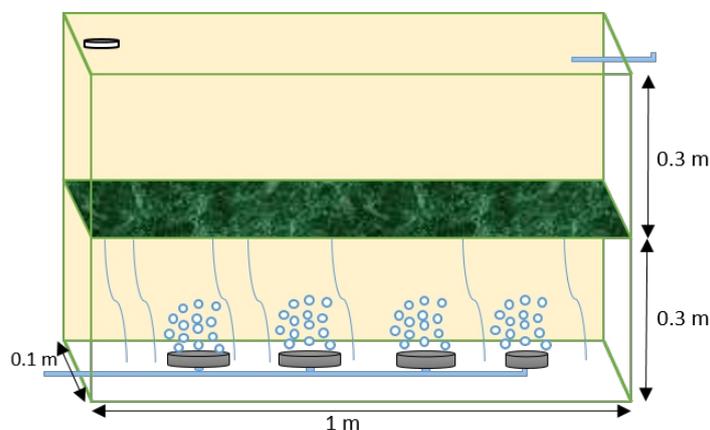


Figura 4. Fotobiorreactor número 2.

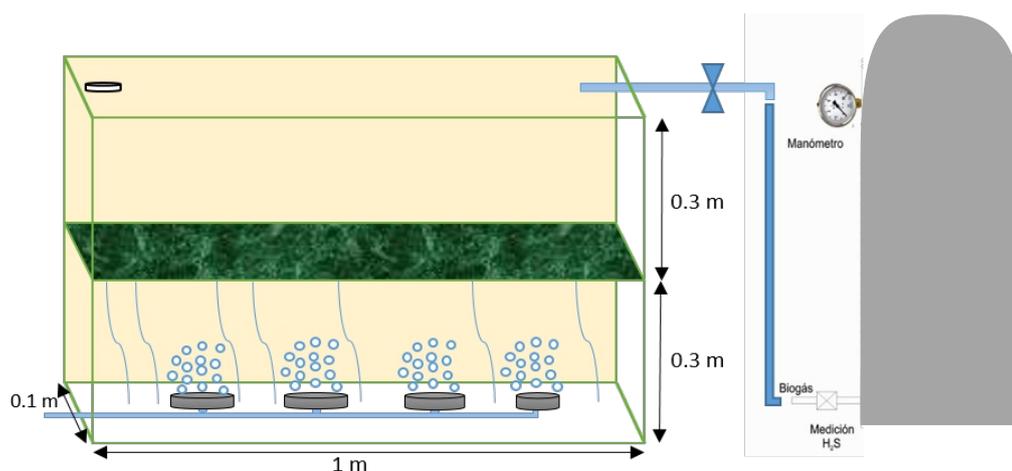


Figura 5. Fotobiorreactor número 3 y almacenamiento del biometano.

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

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<sup>-1</sup>. 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*, la MA se codificó como IMP-BG-074. Se diluyó en el flujo de agua, en las proporciones siguientes: testigo T<sub>0</sub> (0 L de MA y 60 L de flujo de agua); T<sub>1</sub> (1,1 L MA, 60 L de flujo de agua y 50 mL Biol), T<sub>2</sub> (3,3 L MA, 60 L flujo de agua y 100 mL Biol) y el T<sub>3</sub> (6,6 MA, 60 L flujo de agua y 150 mL Biol) (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamiento del biogás y sus repeticiones. T = tratamientos. R = Réplicas.

T <sub>0</sub> = 0	T <sub>1</sub> = 3,3 L	T <sub>2</sub> = 9,9 L	T <sub>3</sub> = 19,8 L
	T <sub>1</sub> R <sub>1</sub> =1,1 L	T <sub>2</sub> R <sub>1</sub> =3,3 L	T <sub>3</sub> R <sub>1</sub> = 6,6 L
	T <sub>1</sub> R <sub>2</sub> =1,1 L	T <sub>2</sub> R <sub>2</sub> =3,3 L	T <sub>3</sub> R <sub>2</sub> = 6,6 L
	T <sub>1</sub> R <sub>3</sub> = 1,1 L	T <sub>2</sub> R <sub>3</sub> =3,3 L	T <sub>3</sub> R <sub>3</sub> = 6,6 L

Por la parte inferior del Fotobiorreactor se alimentó el biogás con CH<sub>4</sub> (70%), H<sub>2</sub>S (0,5%) y CO<sub>2</sub> (29,5%) (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 (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) se absorbieron en el medio líquido y posteriormente recirculan al Fotobiorreactor donde se eliminan mediante la actividad biológica de las

MA. El CO<sub>2</sub> 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.

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 =  $1,2\cdot 10^2$ ; salida =  $1,1\cdot 10^2$ ; porcentaje de remoción de 8,33%) (Varnero *et al.*, 2012). El Potencial energético del biometano obtenido de la purificación del tratamiento químico y biológico del biogás, denominado el poder calorífico, fue calculado siguiendo el método utilizado por Quesada *et al.* (2007).

Se empleó el ANOVA (análisis de varianza) y la prueba de tukey para determinar si existen diferencias significativas entre los  $T_0$  al  $T_3$  para  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  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  $\alpha=0,05$ . El paquete estadístico SPSS versión 25,0 fue empleado para el cálculo de los estadígrafos descriptivos e inferenciales.

## RESULTADOS

La concentración inicial del biogás con el cual se trabajó, fue: 60,4 % de  $\text{CH}_4$ , 39,6 %  $\text{CO}_2$  y 32 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$ . El  $\text{CO}_2$ , absorbido mediante el tratamiento biológico con *C. vulgaris* se presenta en la tabla 2 con cada tratamiento aplicado.

**Tabla 2.** Concentración de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Ácido Sulhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) y poder calorífico en el biogás obtenido en el testigo y en los tratamientos ( $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ).

Tratamientos	$\text{CO}_2\%$	$\text{H}_2\text{S}$ ppm	$\text{CH}_4\%$	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

$T_0$  (0 L de microalgas (MA), 60 L de agua).  $T_1$  (1,1 L MA, 60 L de agua y 50 mL biol).  $T_2$  (3,3 L MA, 60 L de agua y 100 mL biol).  $T_3$  (6,6 L MA, 60 L de agua y 150 mL biol). La prueba de Tukey a un nivel de  $\alpha=0,05$  muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos cuando se presentan letras minúsculas diferentes.

La Tabla 2 muestra que el  $T_2$  fue el tratamiento con mayor fijación de  $\text{CO}_2$  y con mayor concentración de metano, reduciendo el  $\text{H}_2\text{S}$ , y con reducción al 13,6% la concentración de  $\text{CO}_2$  del valor inicial del biogás.  $T_3$  fue el más bajo en depurar  $\text{CO}_2$ . La mayor concentración de  $\text{CH}_4$  en el biogás y el mayor poder calorífico fue obtenido con el  $T_2$ .

## DISCUSIÓN

La ligera disminución del pH a la salida del Fotobiorreactor se experimenta debido a la

formación de ácido carbónico debido al  $\text{CO}_2$  (Ding *et al.*, 2020). Jasni *et al.* (2020) y Srinuanpan *et al.* (2020) sostienen que si el flujo de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , la mayor depuración de este gas significa un mayor potencial del biogás, la que se refleja en el tratamiento  $T_2$  con 25,5% de

concentración de CO<sub>2</sub>. Los resultados fueron similares a Han *et al.* (2012) quienes buscaron fijar el CO<sub>2</sub> con *C. vulgaris*; y a Ho *et al.* (2011) quienes encontraron una mayor tasa de fijación de CO<sub>2</sub> con *C. vulgaris*.

El principal objetivo al obtener el biogás es que presente CH<sub>4</sub> con una mayor concentración, y para ello debe eliminarse el CO<sub>2</sub>. Una de las formas más fáciles es su absorción en agua donde quedan retenidas debido a las diferencias de polaridad entre ellas, mientras el CH<sub>4</sub> no se ve afectado, pues es bastante apolar. Es importante saber que la solubilidad del CO<sub>2</sub> 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<sup>-1</sup> 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 considerados los factores físicos y químicos del medio en solución, siendo estos muy importantes para el trabajo eficiente de las MA (Qin, 2005; Shahid *et al.*, 2019), debido a que dependen de éstos para la adecuada fijación de CO<sub>2</sub>. 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 H<sub>2</sub>S presente en el biogás (Ortega-Viera *et al.*, 2016).

La mayor Concentración de CH<sub>4</sub> fue obtenida con el tratamiento T<sub>2</sub> con 74,5%. Se ha utilizado tecnología de membranas para la eliminación de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> durante el acondicionamiento de biogás en Fotobiorreactores de MA, encontrando concentraciones medias de 95,22% para el CH<sub>4</sub> (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 CH<sub>4</sub> por encima del 90% durante todo el proceso. Nuestros resultados muestran que el O<sub>2</sub> está por debajo de 0,5%, mientras que el N<sub>2</sub> y

el CO<sub>2</sub> están en una proporción mayor pero también por debajo del 5%, lo que aumentaría la eficiencia del biogás. Respecto al H<sub>2</sub>S 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 CO<sub>2</sub> y aumento de la concentración CH<sub>4</sub>. Carrillo (2019) señala que el H<sub>2</sub>S debe ser eliminado antes de ser usado, debido a que uno de los productos de su combustión (SO<sub>2</sub>) ocasiona lluvias ácidas.

López-Hernández *et al.* (2017) mencionan que en el proceso de purificación biológica del biogás, las bacterias utilizan el CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>, que favorecen la producción de CH<sub>4</sub>.

El mayor poder calorífico obtenido para el tratamiento biológico con MA fue de 7049 kcal·m<sup>-3</sup>, 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<sub>4</sub> en su composición y un poder calorífico de 5000 a 6000 kcal·m<sup>-3</sup>, 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 kcal·m<sup>-3</sup> 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.

En conclusión el tratamiento biológico con MA para la remoción de CO<sub>2</sub>, fue mejor en el T<sub>2</sub> de 3,3 L de MA, 60 L de agua y 100 mL de Biol, llegando a una concentración de 25,5% de CO<sub>2</sub>. El T<sub>2</sub> fue el mejor al obtener los mejores valores de metano (74,5%) y de poder calorífico (7049 kcal).

## AGRADECIMIENTOS

A Universidad Nacional de Ucayali-UNU, ejecutora y financiadora principal del proyecto "Obtención de biometano a partir del biogás procedente de lodos de la planta extractora de aceite de Palma, Ucayali - 2019" dentro del cual se ha desarrollado el presente estudio. A la Empresa de Investigación e Innovación Negocios Amazónicos Sustentables EIRL - NEGASUS, ejecutora, colaboradora y co-financiadora del proyecto "Obtención de biometano a partir del biogás procedente de lodos de la planta extractora de aceite de palma, Ucayali - 2019". A la Empresa Agroindustrial Industrias Oleaginosas Monte Alegre – INDOLMASA, por las facilidades, espacio e insumo básico brindadas para el desarrollo de la investigación. A Jesús Cotrina Barrueta y Edward Edinson Rubina Arana, por su apoyo en la ejecución fase de campo y revisión final de informes del proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Amshawee, S.K.; Yunus, M.Y. & Azoddein, A.A. 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.
- Camero, 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 Magister 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-biogas-mediante-procesos-biologicos-una-alternativa-eficiente-economica-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 CO<sub>2</sub> fixation by locally isolated microalgae: *Chlorella sorokiniana* UKM2, *Coelastrrella* sp. Journal of Water Process Engineering, 35: 101202.
- Domínguez, C.L. 2019. *Tecnología de membranas para la eliminación de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> 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.
- Engineering, A. 2020. *Efluentes extracción aceites de palma africana*. Obtenido de [www.aqualimpia.com](http://www.aqualimpia.com): <https://www.aqualimpia.com/biodigestores/pome-palma-efluentes/>
- Escobedo de León, J.R. 2011. *Biogas como combustible alternativo para tma 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems - A review. Biotechnology Advances, 29: 189-198.
- 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.
- 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 biogas 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. 1<sup>er</sup> 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.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.

Received April 10, 2020.

Accepted May 12, 2020.