

Artículo original

Purificación de biogás procedente de lodos de palma aceitera con monoetanolamina (MEA) y Ácido acético (ÁAC)

[Biogas purification derived from oil palm sludge with monoethanolamine (MEA) and Acetic Acid (ÁAC)]

Grober Panduro-Pisco^{*1,2}, Edgar Juan Díaz Zúñiga², Sayuri Julissa Herrera Challco², Rubén Javier Calderón Luján², Rosmery Elizabeth Amalia Noriega Silva²

1. Negocios Amazónicos Sustentables EIRL, Pucallpa, Perú. Av. Pachacútec Mz. 06, Lote 17, Manantay, Pucallpa, Perú. Correo electrónico: ecologrober2012@hotmail.com (G. Panduro-Pisco * Autor para correspondencia).
2. Universidad Nacional de Ucayali, carretera Federico Basadre km 6,200, Pucallpa, Ucayali, Perú. Correos electrónicos: edgarjrdz@gmail.com (E. J. Díaz), julissachallco1997@gmail.com (S. J. Herrera), javiersprit@gmail.com (R. J. Calderón), meryross_15@hotmail.com (R.E.A Noriega).

Resumen

El biogás, considerado alternativo al uso de combustibles fósiles, tiene como impurezas al dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) y debe purificarse para obtener biometano con contenido superior al 90% de metano (CH₄) y ser utilizado como combustible doméstico y automotor. Por ello se ha planteado purificar el biogás procedente de lodos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), utilizando componentes químicos: monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC), como tratamiento testigo T0 y T0' en concentraciones de 30, 50, 70%; la mezcla de ambos en los tratamientos T1 30% MEA y 70% ÁAC, T2 50% MEA y 50% ÁAC y T3 70% MEA y 30% ÁAC. Los resultados muestran para T0 concentraciones de 31% de CO₂, 47 ppm de H₂S y 69% de CH₄ y al T0' con 44% de CO₂, 55 ppm de H₂S y 56% de CH₄; de las mezclas, el mejor resultado se obtuvo con el T1 con 25% de CO₂, 40 ppm de H₂S, 75% de CH₄ y 7145 kcal; concluyendo que el porcentaje de CH₄ registrado (75%) no permite obtener biometano por requerir 90 - 95% de CH₄, pero dicho biogás tiene alta calidad y puede usarse para cocción o para combustible de motores.

Palabras clave: Amina, Biometano, Impurezas.

Abstract

Biogas, considered as an alternative for the use of fossil fuels, has carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S) as impurities and it must be purified to obtain biomethane with more than 90% methane (CH₄) content and to be used as domestic fuel and automotive. Therefore, it has been proposed to purify the biogas from oil palm sludge (*Elaeis guineensis*) using chemical components: monoethanolamine (MEA) and acetic acid (AAC), T0 as control treatment and T0' in concentrations of 30, 50, 70%; the mixture of both (MEC and AAC) in treatments T1 30% MEA and 70% ÁAC, T2 50% MEA and 50% ÁAC and T3 70% MEA and 30% ÁAC. The results show 31% CO₂, 47 ppm H₂S and 69% CH₄ concentrations for T0 and 44% CO₂, 55 ppm H₂S and 56% CH₄ concentrations for T0'; from the mixtures, the best result was obtained with T1 25% CO₂, 40 ppm H₂S, 75% CH₄ and 7145 kcal; in conclusion, the registered CH₄ percentage (75%) does not allow to obtain biomethane because it requires 90 - 95% CH₄, although that biogas has high quality and it can be used for cooking or for motor fuel.

Keywords: Amine, Biomethane, Impurities.

INTRODUCCIÓN

El biogás es un combustible renovable con amplias aplicaciones en todo el mundo (Weiland, 2010; Achina *et al.*, 2017; Alhassan *et al.*, 2019), siendo más de 60,8 mil millones de m³ de biogás lo producido anualmente en el mundo (WBA, 2018). La generación de biogás y su utilización se han vuelto de tratamiento popular por ser un producto ecológico y económico, fuente de energía renovable amigable y fácilmente procesable (Marchaim, 1992; Gunaseelan, 1997), el conjunto de residuos agroindustriales (sólidos y líquidos), conocidos como biomasa y las nuevas formas de aprovecharla es para la producción de bioenergía, siendo preferentemente los residuos sólidos utilizados para generar electricidad y los líquidos han sido evaluados como biocombustibles, como biodiesel, bioetanol y biogás (Vargas y Pérez, 2018). Además, representan una ventaja sobre los combustibles fósiles por ser energías renovables; por ello, entre las diferentes formas de purificación del biogás, también se utilizan proporciones de microorganismos, agua y biol llegando a concentraciones de hasta 25,5% de CO₂, 74,5% de metano y 7049 kcal de poder calorífico (Panduro *et al.*, 2020).

El contenido del biogás es una mezcla de gases metano (o biometano, CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) con menores porcentajes de vapor de agua, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno (o ácido sulfhídrico, H₂S), este último junto con el CO₂ son removidos al purificarse el biogás obteniendo CH₄, que es el gas de mayor interés desde el punto de vista económico, debido a su utilidad como combustible por su alto valor calorífico (Morero y Campanella, 2013; Guo *et al.*, 2015). Los gases no deseados tienen algún efecto nocivo sobre la maquinaria; por ejemplo, el alto contenido de CO₂ (40%) en el crudo del biogás reduce la eficiencia del motor y la potencia de salida al aumentar las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos. Así, en el uso de biogás en centrales eléctricas o de combustión interna, los motores están obstruidos (Marchaim, 1992; Porpatham *et al.*, 2007; Abatzoglou y Boivin, 2009).

La presencia de H₂S causa corrosión en el motor o sistema de tuberías formando sulfuros metálicos a través de reacciones químicas con partes metálicas; por lo tanto, la eliminación de gases contaminados del biogás crudo es necesario no solo para aumentar el valor calórico, sino también para usar el gas de manera segura sin enfrentar ningún riesgo de corrosión (Holm *et al.*, 2009).

Se ha estudiado la implementación de diversas alternativas para retirar los contaminantes presentes en el biogás (Tippayawong y Thanampongachart, 2010), dentro de ellas están los procesos de adsorción química, adsorción física, adsorción en superficie sólida, separación por membrana, separación criogénica, conversión química y procesos biológicos (Morero y Gropeilly, 2010), utilizando diferentes compuestos orgánicos para la purificación del biogás donde las soluciones de aminas (mono, di, tri etanol aminas o glicol aminas) se combinan por el grupo amino [(NH₂)] con CO₂ y H₂S para dar hidrógeno carbonato de amonio RNH₃HCO₃ o sulfuros de amonio RNH₃2S. Las aminas se operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química, pero el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química, siendo necesario operarlos a temperatura de hasta 48 °C (Fernández, 2004a).

Removiendo los gases no deseados del biogás se obtiene biometano, con una concentración de gas metano superior al 95% con lo cual aumenta su poder calorífico (Noyola *et al.*, 2006), siendo una fuente de energía alternativa popular hoy en día, por ello la investigación mundial sobre tecnología de energía sostenible es impulsada principalmente para limitar el uso de combustibles fósiles (Budiyono *et al.*, 2010; Christ *et al.*, 2014). Para enfrentar la amenaza de crisis energética global y contaminación ambiental hay un creciente interés en encontrar fuentes alternativas de energía; basada en ello se planteó la investigación con el objetivo de purificar el biogás mediante la mezcla de monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC) para obtención de biometano.

MATERIALES Y MÉTODO

La investigación se realizó de octubre a noviembre del 2019 en las instalaciones de la Planta de Extracción de aceite de palma de la empresa Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A. – INDOLMASA, con Coordenadas (8°38'58,46" S y 74°58'34,63" O), ubicado en la carretera Federico Basadre km 62, Distrito de Neshuya, Provincia de Padre Abad, Región Ucayali (Perú), con clima predominantemente tropical cálido y húmedo, temperatura media anual de 25 °C, máxima de 35°C, precipitaciones variables entre 1300 y 3000 mm, entre los meses de noviembre a abril, con dos temporadas definidas al año; clima caluroso que alcanza temperaturas de hasta 40°C bajo sombra, y un invierno con precipitaciones torrenciales desde octubre a marzo, época en la que se alcanza hasta 70% de humedad, con vientos de hasta 120 km/hora (Figura 1).

La investigación ha sido experimental del tipo experimentos puros, un diseño con pos prueba únicamente y 2 grupos de control; (Hernández *et al.*, 2006) en el cual la manipulación de la variable alcanza sólo dos niveles; en presencia (varió las proporciones de concentraciones de la mezcla de monoetanolamina y ácido acético) y ausencia grupo de control o testigo (sin mezcla), los cuales fueron sometidos a 3 repeticiones en cada nivel; haciendo un total de 27 unidades experimentales considerando los testigos y mezclas. La población estuvo constituida por biogás de un gasómetro de 2m³, procedentes de un biodigestor de 10 m³ alimentado con 7 m³ de lodos o efluentes del proceso de producción de aceite.

| Tratamientos | Repeticiones y grupos | Concentración de solución | Resultados obtenidos |
|--------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
| T0 | R1G0 | MEA30% | 0 ₁ |
| | R2G0 | MEA50% | 0 ₂ |
| | R3G0 | MEA70% | 0 ₃ |
| T0' | R1G0' | ÁA30% | 0 ₄ |
| | R2G0' | ÁA50% | 0 ₅ |
| | R3G0' | ÁA70% | 0 ₆ |
| T1 | R1G1 | (MEA+AA)30% | 0 ₇ |
| | R2G1 | (MEA+AA)30% | 0 ₈ |
| | R3G1 | (MEA+AA)30% | 0 ₉ |
| T2 | R1G2 | (MEA+AA)50% | 0 ₁₀ |
| | R2G2 | (MEA+AA)50% | 0 ₁₁ |
| | R3G2 | (MEA+AA)50% | 0 ₁₂ |
| T3 | R1G3 | (MEA+AA)70% | 0 ₁₃ |
| | R2G3 | (MEA+AA)70% | 0 ₁₄ |
| | R3G3 | (MEA+AA)70% | 0 ₁₅ |

Este diseño muestra la interacción (MEA y AA) en los grupos experimentales (G1, G2 y G3) con sus repeticiones (R), el testigo o grupo de control (G0 y G0'), así como los resultados que se obtuvieron (01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 010, 011, 012, 013, 014 y 015).

Para producir el aceite, la empresa INDOLMA-SA somete los frutos frescos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en su planta industrial pasando por diversos procesos, pero se emiten residuos sólidos, gases y líquidos, y éstos líquidos son vertidos en pozas superficiales convirtiéndose en lodos contaminantes ya que vienen mezclados con agua y aceite. Estos lodos contaminantes son tomados por la empresa de investigación e innovación Negocios Amazónicos Sustentables EIRL, para ser llenados en biodigestores donde se produce el biogás. Este biogás procedente de los biodigestores de 10 m³ de capacidad, almacenados en gasómetros de 3 m³ de capacidad; ha sido utilizado en la investigación como población y muestra.

El método consistió en la absorción química del dióxido de carbono y ácido sulfhídrico los cuales fueron absorbidos y removidos con el burbujeo del biogás en la solución acuosa de

la mezcla (Tippayawong y Thanompongchart, 2010), donde el biogás ingresa por la parte superior del matraz tipo balón con tres ingresos (Figura 2), hasta llegar a la solución de monoetanolamina y ácido acético en concentraciones de 30%, 50% y 70% y las mezclas de ambos para los T1, T2 y T3 que fluye en contra corriente desde la parte superior como salida del biogás ya tratado o purificado. Los gases CO₂ y H₂S reaccionan químicamente con la amina para formar una sal regenerable. El gas tratado (saturado en agua) sale por la parte superior del matraz tipo balón, durante el proceso de absorción donde alcanza temperaturas entre 45°C a 60°C (Morero, 2014b). Los datos obtenidos en cada tratamiento fueron procesados con el Programa estadístico SPSS 22.0. Los resultados fueron sometidos a análisis de Varianza y para ver si existen diferencias significativas entre ellos, se ha sometido a la prueba estadística de Tukey HSD (Diferencia honestamente significativa), evaluando datos discretos y cuantificando los valores de cantidades de purificación de biogás, porcentaje de CO₂, H₂S y poder calorífico, expresados según concentración o mezclas de cada tratamiento, mediante pruebas paramétricas.

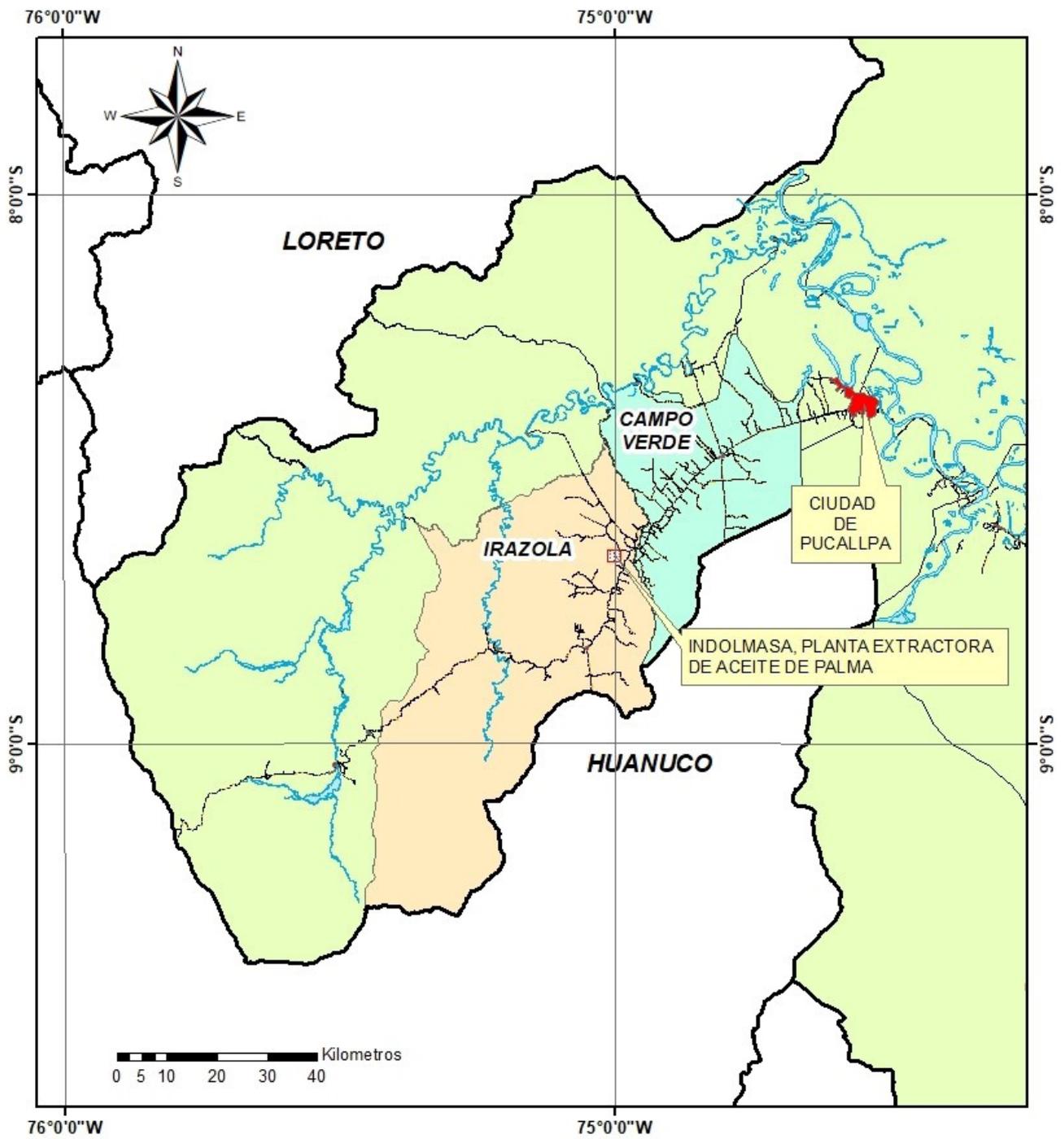


Figura 1. Mapa de ubicación de la empresa INDOLMASA Distrito de Neshuya, Provincia de Padre Abad, Ucayali -Perú-.

RESULTADOS

Concentración de CO₂ y H₂S con el testigo monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC) y las mezclas (MEA+ÁAC)

El tratamiento testigo T0 con 30% de MEA, presentó una concentración del 50% de CO₂ más un incremento del 10% respecto al valor inicial, 56 ppm removiendo 14 ppm de ácido sulfhídrico; mientras que el tratamiento testigo T0 con 50% de MEA, muestra una concentración de 31% de CO₂ con una remoción del 9% de valor inicial, 47 ppm removiendo 23 ppm de ácido sulfhídrico y el tratamiento testigo T0 con 70% de MEA generó 56% de concentración con un incremento del 16% de dióxido de carbono (CO₂), 51 ppm con una remoción de 14 ppm de ácido sulfhídrico. Al realizar la prueba estadística se encontró que existen diferencias significativas entre la varianza de las medias del dióxido de carbono y ácido sulfhídrico; sometida a la prueba de Tukey HSD resulta que la menor concentración de dióxido de carbono fue obtenida con el tratamiento T0 monoetanolamina al 50% de MEA, seguido por el tratamiento T0 con 30% de MEA y el tratamiento T0 con 70% de MEA; sin embargo, para el ácido sulfhídrico la mejor depuración se encontró con tratamiento T0 al 70% de MEA.

El tratamiento testigo T0' con 30% de ÁAC manifestó una concentración del 48% de CO₂ con un incremento de 8%, el tratamiento T0' con 50% de ÁAC presentó una concentración de 45% CO₂ con un incremento del 5% y el tratamiento T0' con 70% de ÁAC, manifestó concentración de 44% de CO₂ con 4% de incremento, en todas las soluciones se presentó una concentración de 55 ppm y una remoción de 15 ppm de ácido sulfhídrico. Por otro lado, la prueba de ANOVA muestra que no existe diferencia significativa entre la varianza de las medias del dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico, con diferentes concentraciones de ácido acético.

El tratamiento T1 (mezcla al 30% de MEA+70% de ÁAC) mostró 25% con una remoción de 15%

de dióxido de carbono (CO₂), 40 ppm con una remoción de 30 ppm de ácido sulfhídrico; el tratamiento T2 (mezcla al 50% de MEA+50% de ÁAC) reportó una concentración por 27% de CO₂ con una depuración del 13%, 47 ppm con reducción de 23 ppm de ácido sulfhídrico y el tratamiento T3 (mezcla al 70% MEA+30% ÁAC) manifestó un 32% de CO₂ con una remoción de 8%, 34 ppm con una remoción de 36 ppm de ácido sulfhídrico; por último, los testigos que mostraron mejor resultado, tratamiento T0 con 50% de MEA, se obtuvo concentraciones de 31% de CO₂ con una depuración de 9%, 47 ppm con una remoción de 23 ppm de ácido sulfhídrico. El tratamiento T0' con 70% de ÁAC reportó una concentración de 44% CO₂, mostrando incremento de 4% respecto a su valor inicial, el ácido sulfhídrico mostró 55 ppm que refleja una reducción de 15 ppm respecto a su valor inicial. La prueba de ANOVA muestra que existe diferencia significativa de 0,000 y 0,001 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias de la concentración de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico respectivamente; la Prueba de Tukey HSD (Diferencia honestamente significativa) muestra que la menor concentración de dióxido de carbono fue obtenida para el tratamiento T1 (MEA+ÁAC al 30%), seguido tratamiento T2 (MEA+ÁAC al 50%), el tratamiento T3 (MEA+ÁAC al 70%), el tratamiento T0 (MEA al 50%) y el tratamiento T0' (ÁAC al 70%); para el ácido sulfhídrico se muestra la mejor depuración para el tratamiento T3 (MEA+ÁAC al 70%), seguido por el tratamiento T1 (MEA+ÁAC al 30%), el tratamiento T0 (MEA al 50%), el tratamiento T2 (MEA+ÁAC al 50%) y para el tratamiento T0' (ÁAC al 70%).

Concentración de CH₄ con el testigo monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC) y las mezclas (MEA+ÁAC)

El tratamiento testigo T0 con 30% de MEA generó una concentración de 50% con reducción del 10,4% de metano, el tratamiento testigo T0 con 50% de MEA presentó una concentración de 69% con un aumento de 8,4% de metano y al tratamiento T0 con 70% de MEA generó 44% de concentración de metano con una pérdida

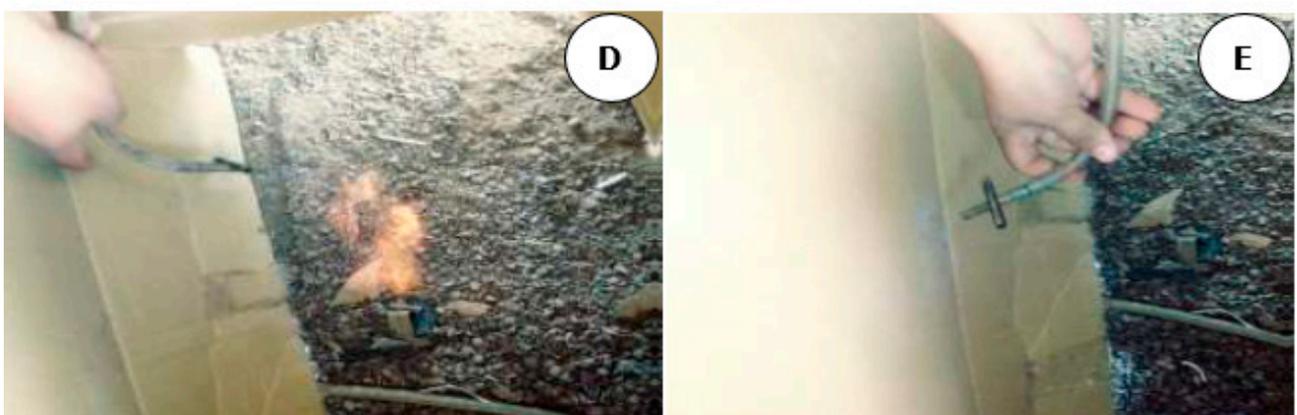
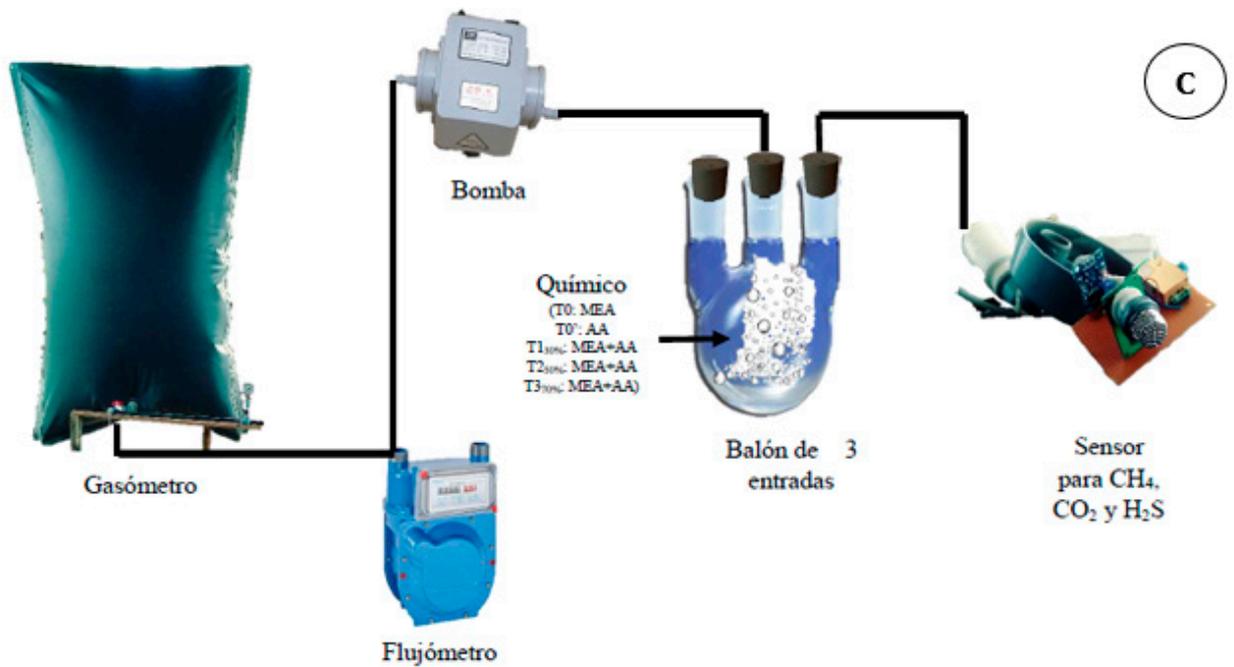
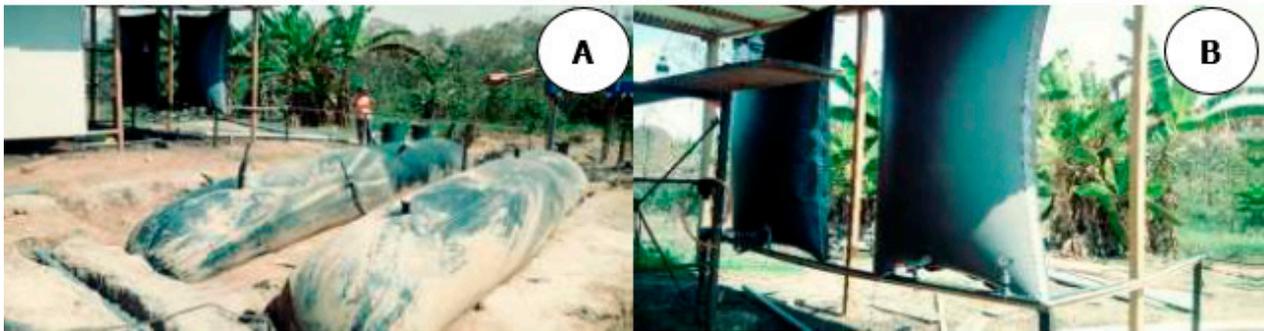


Figura 2. Fotos (NEGASUS EIRL). Proceso de purificación; A: Sistema de generación de biogás. B: Sistema de almacenamiento de biogás. C: Sistema de purificación de biogás con testigos y mezclas de MEA y ÁAC. D, E: Llama anaranjado con biogás inicial y llama azul con biogás final.

de 4%. La prueba de ANOVA muestra que existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias de metano y la Prueba de Tukey HSD (Diferencia honestamente significativa), donde la mayor concentración de metano fue obtenida con el tratamiento testigo T0 con 50% de MEA, seguido por el tratamiento testigo T0 con 30% de MEA y el tratamiento testigo T0 con 70% de MEA; respectivamente.

El tratamiento testigo T0' con 30% de ÁAC, generó una concentración de metano de 54% con una reducción de 6,4%, el tratamiento testigo T0' con 50% de ÁAC generó 55% de metano reduciendo 5,4% y el tratamiento testigo T0' con 70% de ÁAC generó una concentración de 56% de metano con una reducción de 4,4%. El análisis de varianza ANOVA (muestra que no existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias del metano.

El tratamiento T1 (mezcla MEA al 30%+ÁAC al 70%) generó 75% de concentración de metano con incremento de 14,6%, el tratamiento T2 (mezcla MEA al 50%+ÁAC al 50%) manifestó una concentración de 73% de metano incrementando 12,6% y el tratamiento T3 (mezcla MEA al 70%+ÁAC al 30%) reportó 68% de concentración de metano (CH₄) incrementando un 7,6%; los testigos mostraron con 69% de metano con tratamiento T0 de MEA-30% y una pérdida de metano con 56% obtenido con el tratamiento T0' de ÁAC-70%. El análisis de varianza ANOVA 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 T1, T2, T3 y T0 con 50% de MEA y el tratamiento T0' con 70% de ÁAC, Tukey HSD muestra que la mayor concentración de metano es para el tratamiento T1 seguido por el tratamiento T2, tratamiento T0 con 50% de MEA, el tratamiento T3 y el tratamiento T0' con 70% de ÁAC.

DISCUSIÓN

La intención de producir biometano ha permitido la utilización de monoetanolamina y ácido acético como ingredientes químicos llegando a reducir concentraciones importantes de los gases contaminantes CO₂, H₂S y producción de CH₄; sin embargo, el porcentaje de concentración obtenido (75%) no ha permitido la obtención de biometano debido a que para ello la concentración de metano debe ser superior a 95%, siendo necesario la utilización de soluciones de Ca(OH)₂, que remueven completamente el CO₂ y H₂, (Varnero 2011), mientras que en nuestro experimento se obtuvo el mejor resultado (75% de metano) con la mezcla de 70% monoetanolamina y 30% ácido acético; resultado que nos induce a probar otros componentes químicos en próximas pruebas.

Respecto a la concentración de CO₂ y H₂S con el testigo monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC) y las mezclas (MEA+ÁAC), el experimento desarrollado, muestra que el tratamiento testigo T0 con 30% de MEA, presentó una concentración de dióxido de carbono del 50% y 56 ppm de ácido sulfhídrico; al respecto, en condiciones similares de temperatura (43,3°C a 65,5°C), Morero y Campanella (2013b), obtuvieron 0,05% de dióxido de carbono (CO₂) y 0,28 ppm de ácido sulfhídrico con monoetanolamina al 20%. El tratamiento T0' con 30% de ÁAC mostró una concentración de dióxido de carbono del 48%, mientras que el tratamiento T0' con 50% de ÁAC y el tratamiento T0' con 70% de ÁAC, presentó una concentración de 45% y 44% de dióxido de carbono, asumiendo que la depuración del dióxido de carbono y ácido sulfhídrico está en función a moles de amina (NH₂) y que sería necesario la utilización de otros compuestos químicos; por ello es necesario recalcar que el objetivo de obtener biogás es que presente metano con mayor concentración y para ello debe eliminarse el CO₂, dado que la solubilidad del CO₂ en agua depende de la presión, la temperatura y del pH, (Carrillo, 2019).

Las respuestas más prometedoras se han registrado con el tratamiento T0 con 50% de MEA y el tratamiento T0' con 70% de ÁAC, obtenien-

do 31% y 44% de concentración de dióxido de carbono (CO₂) respectivamente; trabajo similar desarrollaron Morero y Campanella (2013c) y mezclando metildietanolamina (MDEA al 35%) con monoetanolamina (MEA al 15%) obtuvieron una concentración de 0,025% de dióxido de carbono mejorando su capacidad de absorción; asimismo, Morero (2014c), mezcló metildietanolamina (MDEA al 35%) con monoetanolamina (MEA al 15%) para mejorar sus propiedades de absorción, llegando a una concentración final de 0,011% de dióxido de carbono; sin embargo, establece que esta disminución en dióxido de carbono no es suficiente para alcanzar mayores niveles de valoración, ya que existe relación inversa entre el incremento de temperatura y la disminución de metano, afirmación que respalda Fernández (2004b), respecto a que las aminas operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química; sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química. En México, Teniza *et al.* (2015) trabajando con estiércol de cabra y vísceras de conejo al 10%, produjeron biogás con 71% de metano ajustando el pH a 7,2 y temperatura de 37°C, reforzando la afirmación anterior en el sentido de que la temperatura es el parámetro con mayor efecto sobre la producción de metano.

Por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta 48 °C, ayudando a la disminución del dióxido de carbono (CO₂) en el biogás, siendo importante la concentración y mantenimiento de la temperatura constante durante la absorción de tal manera que no se interrumpa la reacción. Existen muchos aspectos a tener en cuenta a la hora de optimizar una unidad de endulzamiento con aminas, debe seleccionarse adecuadamente la amina a utilizar además de tener en cuenta otros factores por ejemplo, la concentración de las aminas, el uso de mezclas de aminas y la temperatura de la solución que ingresa al absorbedor, según manifestaron Lunsford y Bullin (1996); las aminas operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química, sin embargo el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química, por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura

hasta 48 °C (Fernández, 2004c); mientras que en México, la producción de metano con excretas de cerdo y cabra dio mejores resultados con temperatura de 37°C y pH ligeramente ácido, (García *et al.*, 2014).

La optimización energética es un punto importante, esto requiere maximizar la potencia de cada unidad de volumen circulado y al mismo tiempo realizando mezclas que mejoren la capacidad de absorción como la adición de aminas primarias o secundarias a las terciarias con la finalidad de absorber mayor dióxido de carbono (Jenkins y Haw, 2002a; Nuchitprasittichai y Cremaschi, 2011). Utilizando cuatro tipos de aminas (monoetanolamina, dietanolamina, diglicolamina y metildietanolamina) y dos mezclas de ellas, Morero y Campanella (2012a), analizaron las variables concentración de metano, anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y agua en el gas purificado, el consumo de energía en el proceso, la temperatura de absorción y la tasa de vapor utilizada en el vaporizador, encontrando los mayores niveles de purificación con diglicolamina (97,3% de metano).

La mayor cantidad de depuración de ácido sulfhídrico se ha registrado con el tratamiento T3 (MEA al 30%+ÁAC al 70%), reportando además 34 ppm; sin embargo Morero y Campanella (2013d) encontraron mejores resultados con un valor de 0,078 ppm de ácido sulfhídrico con la mezcla de metildietanolamina (MDEA al 30%) con monoetanolamina (MEA al 15%), probablemente debido a que estos compuestos son gases extremadamente tóxico e irritante que produce inconsciencia, conjuntivitis dolor de cabeza, deficiencia respiratoria, alteraciones en electrocardiograma, en el sistema nervioso central del ser humano y es incoloro, inflamable y extremadamente peligroso (Viquez, 2010), con la adicional desventaja de provocar corrosión en el motor o sistema de tuberías formando sulfuros metálicos a través de reacciones químicas con partes mecánicas, Holm *et al.* (2009b).

El trabajo reportado por Morero y Campanella (2012e), muestra que la absorción de azufre mejora considerablemente y puede ser utilizado en motores de combustión interna evitando

una corrosión acelerada en las piezas metálicas debido a que el mecanismo de corrosión de azufre se inicia en presencia de una concentración de H_2S superior a 50 ppm; reduciendo la vida útil del motor en un 10 a 15% (Hori-kawa *et al.*, 2004), Gosh (2007). Otra observación importante es que al realizar la mezcla de estos compuestos se incrementan los enlaces de carbono e hidrógeno de etanol a propanol, aportando con ello mejoras para absorción del Ácido sulfhídrico en la mezcla; sobre ello Jenkins y Haw (2002b), afirman que cada mol de ácido sulfhídrico (H_2S) reacciona con un mol de amina (NH_2), por lo que la capacidad real de extracción de gas ácido de cada amina está relacionada con el número de moles de amina que se encuentran por unidad de volumen de circulación de la solución.

Respecto a la concentración de metano con aplicación de monoetanolamina y ácido acético y las mezclas de ambas, la dilución del tratamiento T0 con 30% de MEA, generó una concentración de metano del 50%, mientras que el tratamiento T0 con 50% de MEA y el tratamiento T0 con 70% de MEA, generó una concentración al 69% y 44% de metano, siendo superior a otros trabajos desarrollados donde las diluciones se reportan por debajo del 20%; asimismo mantener constante la temperatura es un factor importante, en nuestro caso fue de acuerdo a la reacción química entre el absorbente (amina) y el gas (biogás), encontrándose entre 45° a 60 °C.

Cuando diluimos el tratamiento T0' con 30% de ÁAC, se ha generado una concentración de metano de 54%, con el tratamiento T0' con 50% de ÁAC generó una concentración de 55% de metano y con el tratamiento T0' con 70% de ÁAC, se generó 56% de metano, siendo que para todos los tratamientos se obtuvo reducción o pérdida del metano, encontrando que a mayor concentración (70%) se encontró menor pérdida de metano, debido al incremento del dióxido de carbono; Morero y Campanella (2013f), reportaron una concentración de 97,3% de metano con diglicolamina al 50%, siendo esto una amina primaria al igual que el obtenido por la

mezcla de monoetanolamina con ácido acético al 50%, formando una amina primaria llamada metilpropanolamina donde se encontró una concentración del 73% de metano, mostrando una mejora de 8,6% en la concentración del metano respecto al inicial; pero en otro estudio Morero y Campanella (2013g), alcanzaron mayor concentración de metano con una menor temperatura, en la mezcla de metildietanolamina al 35% y monoetanolamina al 15% registrándose 97% de metano a 43,3°C, resaltando la proporcionalidad inversa de su incremento respecto a la disminución de la temperatura; por otro lado las aminas operan en procesos calientes favoreciendo la reacción química, no obstante, debe controlarse la temperatura para que el calor no sea excesivo porque puede causar vaporización, pérdida de la solución y metano (Varnero *et al.*, 2012; Morero y Campanella, 2013h), mencionan además que para alcanzar la composición del biometano se necesita concentraciones entre 90-95% de metano; en nuestro experimento, no pudo obtenerse biometano, sin embargo la calidad es alta, pudiendo ser utilizada en la cocción de alimento o combustible en motores de combustión interna de cuatro tiempos con total seguridad debido a su alto poder calorífico y la concentración de ácido sulfhídrico que está por debajo del límite permisible (50 ppm), explicación que ha sido escrita líneas arriba por Varnero (2011), respecto al incremento de la concentración de metano.

CONCLUSIÓN

El tratamiento químico mezclando monoetanolamina y ácido acético en solución llamada metilpropanolamina para la purificación del biogás, fue mejor con la mezcla de 70% de monoetanolamina y 30% ácido acético, reflejada en la concentración final de 25% de dióxido de carbono y 75% de metano.

Se ha reducido la concentración de gases contaminantes CO_2 , H_2S , sin embargo, la producción de metano solo ha llegado a 75% y no ha permitido la obtención de biometano (concentración de metano superior a 95%).

Las próximas investigaciones sobre este tema deberán incluir al hidróxido de calcio llamada también cal muerta/cal apagada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, debido a que las referencias indican que remueven completamente el CO_2 y H_2 , además de mejorar el pH.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento a la Universidad Nacional de Ucayali –UNU–, ejecutora y financiadora del proyecto “Obtención de biometano a partir del biogás procedente de lodos de planta extractora de aceite de Palma, Ucayali – 2019” por el cual se ha desarrollado el presente estudio. De forma especial a la Empresa de Investigación e Innovación Negocios Amazónicos Sustentables EIRL – NEGASUS, co-financiadora y ejecutora del mismo proyecto. A la empresa Agroindustrial Industrias Oleaginosas Monte Alegre – INDOLMASA en la persona de su gerente Norberto Angulo García, por las facilidades, espacio e insumo básico brindadas para el desarrollo de la investigación. A Jesús Cotrina Barrueta y Edwar Edinson Rubina Arana, por su apoyo en la fase de ejecución de campo y revisión final de informes del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abatzoglou, N. y Boivin, S. (2009) A review of biogas purification processes. *Bioprod. Bio-ref* [en línea], 3, 42-71. Disponible en <<https://doi.org/10.1002/bbb.117>> [Consulta: 10 de Mayo 2020].
- Achinas, S., Achinas, V., y Euverink, G. (2017) A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering* [en línea], 3 (3), 299-307. Disponible en <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917304228>> [Consulta: 10 de Mayo 2020].
- Alhassan, K., Abdullahi, B., y Shah, M. (2019) A review on biogas production as the alternative source of fuel. *Journal of Applied and Advance Research* [en línea], 4 (2), 61-65. Disponible en <<https://phoenix-pub.org/journals/index.php/jaar/article/view/26615>> [Consulta: 15 de Mayo 2020].
- Budiyo, B., Widiya, N., Johari, S. y Sunarso, S. (2010) The Kinetic of Biogas Production Rate from. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* [en línea], 3, 39-44. Disponible en <http://eprints.undip.ac.id/36525/1/v3-1-8_ARTIKEL.pdf> [Consulta: 28 de abril de 2020].
- Carrillo, J. (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.
- Merlin Christy, P., Gopinath, L. y Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier* [en línea], 34 (C) 167-173. Disponible en <<https://ideas.repec.org/s/eee/renewus.html>> [Consulta: 29 abril 2020].
- Fernández, E. (2004) Procedimiento para la purificación de biogás. Habana, Cuba, *Información Tecnológica* [en línea], 1, 18. Disponible en <<https://scielo.conicyt.cl/scieloOrg/php/similar.php?lang=es&text=%20Procedimiento%20para%20la%20purificaci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s>> [Consulta: 29 de abril 2020].
- García-Galindo, O., Pedroza-Sandoval, A., Chávez-Rivero, J., Trejo-Calzada, R. y Sánchez-Cohen, I. (2015) Evaluación de fuentes de materia orgánica fecal como inóculo en la producción de metano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6 (2), 35-49.
- Gosh, D. (2007) Wet H₂S cracking problem in oil refinery processes – material selection and operation control issues. En: *The 2007 Tri-service Corrosion Conference*, Denver, Colorado, USA, 3 -7, 2007
- Gunaseelan, V. (1997) Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass Bioenergy* [en línea], 13 (1), 83-114. Disponible en <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953497000202>> [Consulta: 8 de Mayo 2020].

- Guo, M., Song, W. y Buhain, J. (2015) Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 42, 712-725. Disponible en <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008302>> [Consulta: 8 de Mayo 2020].
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., Baptista-Lucio, P. (2006) *Metodología de la Investigación*. Cuarta edición. Editorial McGraw-Hill INTERAMERICANA editors S.A. México D.F. ISBN 970-10-5753-8.
- Holm, J., Seadi, T. y Oleskiewicz, P. (2009) The Future of Anaerobic Digestion and Biogas Utilization, *Bioresour Technol* [en línea], 100 (22). 5478-5484. Disponible en <<https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.04>> [Consulta: 2 de Mayo 2020].
- Horikawa, M., Rossi, M., Gimenes, M., Costa, C., Da Silva, M. (2004) *Chemical absorption of H₂S for biogas purification*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* [en línea], 21 (3), 415-422. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/26392834_Chemical_absorption_of_H2S_for_biogas_purification> [Consulta: 4 de Abril 2020].
- Jenkins, J. y Haw, R. (2002) Understanding gas treating fundamentals. *Refining Gas Processing Petrochemicals*. Reprinted from PTQ (Petroleum Technology Quarterly) [en línea], 2001-2 issue. Disponible en <<http://reclaim.com/wp-content/uploads/2013/10/understanding-gas-treatment-fundamentals.pdf>> [Consulta: 20 de Mayo 2020].
- Lunsford, K. y Bullin, J. (1996) Optimization of Amine Sweetening Units. Bryan Research and Engineering, Inc. *Technical Papers. Proceedings of the 1996 AIChE Spring National Meeting* [en línea], 1, 1-6. Disponible en <<https://www.bre.com/PDF/Optimization-of-Amine-Sweetening-Units.pdf>> [Consulta: 8 de Mayo 2020].
- Marchaim, U. (1992) *Biogas technology as an environmental solution to pollution*. 1º ed. Roma: Bull. FAO Agric. Services.
- Morero, B. y Campanella, E. (2013) Simulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación de Biogás. *Información Tecnológica* [en línea], 23 (1), 25-32. Disponible en <<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100004>> [Consulta: 22 de Mayo 2020].
- Morero, B. y Gropelly, E. (2010) Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y Tecnología* [en línea], 10, 187-201. Disponible en <https://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2012/cyt/numero10/10N_ISEU_CyT12.pdf> [Consulta: 13 de Abril 2020].
- Morero, B., Croquer, M., Gropelli, E. y Campanella, E. (2011) Comparación de diferentes soluciones de aminas para la purificación de biogás. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* [en línea], 15, 97-103. Disponible en <<http://hdl.handle.net/11336/24209>> [Consulta: 20 de Mayo 2020].
- Morero, B. (2014) *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Tesis para la obtención del grado académico de Doctora en Tecnologías Químicas.
- Noyola, A., Morgan, J. y López, J. (2006) Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Rev Environ Sci Biotechnol* [en línea], 5, 93-114. Disponible en <<https://doi.org/10.1007/s11157-005-2754-6>> [Consulta: 12 de Mayo 2020].
- Nuchitprasittichai, A. y Cremaschi, S. (2011) Optimization of CO₂ capture process with aqueous amines using response surface methodology. *Computers and Chemical Engineering* [en línea], 35, 1521-1531. Disponible en <<https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-CO2-capture-process-with-aqueous-Nuchitprasittichai-Cremaschi/0fa17329bdab1e7536be4c01bb13cb187717fa62->>> [Consulta: 8 de Mayo 2020].
- Panduro-Pisco, G., Calderón-Lujan, R., Herrera-Challco, S. y Iannacone, J. (2020) Purificación biológica de biogas procedentes de lodos de planta de palma aceitera, utilizando microalgas. *The Biologist* [en línea], 18 (1), 1-13. Disponible en <<http://revistas.unfv.edu.pe/index.php/rtb/article/>

- view/539/479> [Consulta: 20 de Mayo 2020].
- Porpatham, E., Ramesh, A., y Nagalingam, B. (2007) Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], 32, 2057-2065. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/222807203_Effect_of_hydrogen_addition_on_the_performance_of_a_biogas_fuelled_spark_ignition_engine> [Consulta: 15 de Abril 2020].
- Teniza-García, O., Solís-Oba, M., Pérez-López, M., González-Prieto, J., Valencia-Vásquez, R. (2015) Produccion de metano utilizando residuos cunícolas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14 (2), 321-334.
- Tippayawong, N. y Thanompongchart, P. (2010) Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy, Elsevier*, [en línea], 35 (12), 4531-4535. Disponible en <<https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v35y2010i12p4531-4535.html>> [Consulta: 12 de Mayo 2020].
- Vargas Corredor, Y. y Pérez Pérez, L. (2018) Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* [en línea], 14 (1), 59-72. Disponible en <<http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb>> [Consulta: 25 de Abril de 2020].
- Varnero, M., Carú, M., Galleguillos, K., y Achondo, P. (2012) Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, [en línea], 23 (2), 31-40. Disponible en <<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>> [Consulta: 18 de Abril 2020].
- Varnero, M. (2011) Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32 "Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables". Ministerio de energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Santiago de Chile.
- Viquez Arias, J. (2010) Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S (g))/ácido sulfhídrico (H₂S (aq)) en el biogás. *ECAG Informa* [en línea], 53 (1), 16-21. Disponible en <<http://nebula.wsimg.com/858cfa23e4f7673d37430eb60925c021?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1>> [Consulta: 10 de Mayo 2020].
- World Bioenergy Association-WBA. (2018) Global Bioenergy Statistics 2018: Summary [en línea], Disponible en <<https://worldbioenergy.org/>> The global voice of bioenergy.
- Weiland, P. (2010) Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* [en línea], 85, 849-860. Disponible en <<https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>> [Consulta: 15 de Mayo 2020].

Conflicto de interés

Los autores manifestamos que no existe conflicto de intereses divergentes para la estructuración, redacción y publicación del presente manuscrito. Así mismo manifestamos que estamos de acuerdo y conformes con el orden establecido para los autores y se designa como autor de correspondencia a Grober Panduro Pisco.

