

Potencial energético de la zona rural del Departamento de La Libertad (Perú) producido por biogas obtenido de excretas humanas

Energy potential of the rural area of “La Libertad” department (Peru) produced by biogas obtained from human waste

Guillermo Alberto Linares-Lujan¹, Carlos Echeverria-Perez², Tatiana Céspedes-Aguilar²

Fecha de recepción: 15 de marzo de 2017
Fecha de aprobación: 28 de mayo de 2017

Linares-Lujan, G., Echeverria-Perez, C., Céspedes-Aguilar T. Potencial energético de la zona rural del Departamento de la Libertad (Perú) producido por biogas obtenido de excretas humanas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 30-4. Octubre-Diciembre 2017. Pág 108-117.

DOI: 10.18845/tm.v30i4.3415

-
- 1 Docente asociado de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial - Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo. Perú. Correo electrónico: glinares@unitru.edu.pe.
 - 2 Egresados de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial - Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo. Perú.



Palabras clave

Potencial energético; excretas humanas; población rural; emisión de CO₂; biocombustibles.

Resumen

A partir de la década del 2000, el potencial energético de las excretas humanas ha obtenido mayor atención debido a su capacidad de producción de biogás. Esta es una alternativa con alto impacto en las zonas rurales donde los recursos y las condiciones precarias no permiten tener accesos a servicios básicos como la electricidad y frenan el desarrollo de la comunidad, y donde a su vez se puede reducir la emisión de CO₂ al medio ambiente en comparación con la forma tradicional de generación de energía (carbón y madera).

En Latinoamérica, existen zonas en extrema pobreza las cuales requieren de atención y ayuda para empezar su proceso de desarrollo. En ellas se resalta como recurso no explotado a las excretas humanas, que con un proceso biotecnológico y un tratamiento para eliminar los organismos patógenos se puede convertir en fuente energética para la población.

En este estudio se determinó el potencial energético de las excretas humanas de la zona rural del Departamento de la Libertad, en donde se encuentran 7 de los 20 distritos más pobres del Perú. Se estimó que la población rural total para el año 2017 en la zona será de 468,979 personas, de las cuales se puede obtener 3427.49 Nm³/día de biogás que representa 1'251,033 Nm³ de biogás anual si se aprovecha el total de las excretas. El biogás que se generaría en el año 2017 representa un potencial energético de 7'506,198 kWh, que se puede transformar en 2'251,859 kWh de electricidad valorizado en US \$ 245,685.

Keywords

Energy Potential; human excreta; rural population; CO2 emission; biofuels.

Abstract

From year 2000, the energy potential of human waste has been given more attention due to its biogas production capacity. This is an alternative with a high impact in rural areas where resources and precarious conditions do not allow access to basic services such as electricity and slow the development of the community, and where in turn it can reduce the emission of CO₂ to the environment compared to the traditional form of energy generation (coal and wood).

In Latin America, there are extreme poverty areas which require attention and help to begin their development process. Human waste are highlighted as an unexploited resource, which with a biotechnological process and treatment to eliminate pathogenic organisms can become an energy source for the population.

This study determined the energy potential of human waste in rural areas of the Department of "La Libertad", where 7 of the 20 poorest districts in Peru are located. It was estimated that the total rural population by 2017 in the area will be 468,979 people, from which 3427.49 Nm³ / day of biogas can be obtained which represents 1'251.033 Nm³ of annual biogas if the total waste is use. The biogas that would be generated in 2017 represents an energy potential of 7'506,198 kWh, which can be transformed into 2'251,859 kWh of electricity, valued at US \$ 245,685 per year.

Introducción

Uno de los principales retos de saneamiento rural es desarrollar e implementar sistemas innovadores, fáciles de usar y de bajo costo. Los sistemas de recolección y tratamiento a base de alcantarillado centralizados existentes en los países desarrollados son demasiado costosos, demasiado complejos; y utilizan demasiada energía para poner en práctica en los países pobres y menos desarrollados [1] [2].

Incluso en los países desarrollados, la conexión de los asentamientos humanos dispersos, casas aisladas, pérgolas, granjas y algunas otras instalaciones, a los sistemas de alcantarillado es a menudo demasiado costosa. En definitiva, la gestión descentralizada de aguas residuales es inevitable para el tratamiento de las mismas y protección integral del medio ambiente en todo el mundo. Las tecnologías de saneamiento descentralizados tienen el potencial para convertir la orina y las heces con valor fertilizante en productos finales seguros para fines agrícolas [3] [2].

El nitrógeno y el fósforo tienen el mayor valor en este contexto, mientras que la materia orgánica ofrece potencial posible de recuperación de energía. La cantidad de heces y la orina excretada diariamente por las personas varía considerablemente en función del consumo de agua, el clima, la dieta y la ocupación. Mientras que la masa húmeda de las heces excretadas tiene rangos diarios entre 70 y 520 g por persona por día ($\text{g.p}^{-1}.\text{d}^{-1}$), una cantidad de 350-400 $\text{g.p}^{-1}.\text{d}^{-1}$ se considera generalmente como un promedio razonable [4] [5].

El biogás, producto de la descomposición de materia orgánica, es un gas combustible, el cual puede ser usado para cocción de alimentos, calefacción y las múltiples aplicaciones que tiene los combustibles convencionales. Los sistemas de biodigestión junto a la producción de energía eléctrica a base de biogás son tecnologías aún prematuras en Perú, existiendo 106 biodigestores (en 15 departamentos) con predominio en modelos artesanales chinos en todo el Perú [6].

El biogás obtenido en los digestores contiene de 60 a 80% de metano y su poder calorífico es de aproximadamente 6 kWh/Nm^3 (800 BTU/pe^3), lo que permite emplearlo con propósitos de generación de energía; en iluminación y medio de calentamiento para cocción de alimentos; como combustible para una caldera; para calentar un espacio o en equipos de refrigeración. El poder calorífico aprovechable depende del rendimiento de los quemadores o de los equipos que funcionan a base del biogás [7]. La facilidad de uso de biogás y su equivalente se pueden ver en el cuadro 1.

Cuadro 1. Uso y equivalencia del biogás. Fuente: [8].

Aplicación	1 m ³ biogás equivalente
Iluminación	Igual a 60 -100 Watts por 6 horas
Cocina	Puede cocinar las 3 comidas para una familia de 5 – 6 personas
Sustitución de combustible	0.7 kg de petróleo
Potencia del eje	Puede ejecutar un motor de 1 HP por 2 horas
Generación de electricidad	Puede generar 1.25 kWh de electricidad

El Perú cuenta con la primera planta de generación eléctrica a partir de biogás en la Amazonía que brindará energía limpia a la zona. La planta de generación eléctrica, ubicada en Tocache, San Martín fue construida por el Grupo Palmas, empresa agroindustrial sostenible dedicada al cultivo de la palma aceitera y cacao en el oriente peruano. Esta planta genera 1,900 kW que es destinada al Complejo Industrial de Palmawasi. El biogás se obtiene del tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de producción de aceites. Las aguas residuales tienen un alto componente de materia orgánica, que se limpia en una planta de tratamiento con microorganismos; durante el proceso de limpieza se genera gas metano que se aprovecha para la generación de electricidad [9].

Por otra parte la idea de que los desechos humanos puedan ser usados como energía calórica o para alumbrar el hogar, se hizo una realidad en Vilcún (Chile). El Municipio de Vilcún, encabezado por su directora, Marcela Vega, presentó en sociedad el primer Biodigestor capaz de convertir el excremento humano y la orina en biogás para el uso de cocinas y calefactores en la vivienda. Este artefacto es único en Chile y en Latinoamérica [10].

Se puede observar claramente que el uso de energías limpias no está ajeno a nuestra realidad, si utilizamos la excreta humana de las aguas negras, que pocas veces son tratadas por las Empresas Prestadoras de Servicios (EPS), las cuales son principalmente vertidas al mar, los ríos o los lagos, dando origen a una seria contaminación de las aguas por saturación de materia orgánica y por los patógenos contenidos (bacterias, virus, huevos de parásitos, etc.) [11].

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática [12] en base a los resultados de la Encuesta Nacional de Hogares continua 2012 (ENAH0), el 26.3 % de la población Libertense está en situación de pobreza total y de ésta, el 6.0% vive en condición de pobreza extrema. Si bien es cierto, en la Libertad, durante el último quinquenio, se ha mejorado notoriamente las condiciones de vida de la población, reflejado en la disminución de 10.5 puntos porcentuales la incidencia de la pobreza total al año 2012, aún existen brechas marcadas por ámbito de residencia urbano y rural.

El acceso a servicios básicos de la vivienda de calidad es un componente importante del desarrollo humano, que posibilita un aumento del bienestar y la menor exposición a enfermedades provenientes de un bajo nivel de servicios básicos de saneamiento [13].

En este contexto, la presente investigación tiene por objetivo calcular el potencial energético de las excretas humanas, focalizando su estudio en la zona rural del Departamento de la Libertad (Perú), aportando ideas al desarrollo y utilización de energías limpias en los pueblos más pobres.

Resultados y discusión

Población Rural – La Libertad - Perú

El Departamento de La Libertad cuenta con 7 de los 20 distritos más pobres del Perú: Curochos (distrito más pobre), Condormarca, Bambamarca, Uchuncha, Huaso, Taurija, Sitabamba. Según en INEI [14], la población de La Libertad en el año 2015 estimada a partir del VI censo poblacional del 2007 fue de 1'859,640 personas, de las cuales el 24,6% corresponden a zona rural.

La tasa de crecimiento poblacional entre los años 2010 y 2015, para la región la libertad es de 1.25 % [14], con este porcentaje se determinó la población Rural de La Libertad en los años 2017 al 2022, como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Población rural del departamento de La Libertad estimada para los años 2017 al 2022.

Año	Población rural
2017	468979
2018	474841
2019	480777
2020	486787
2021	492872
2022	499032

El uso de excrementos humanos para la generación de biogás

Los excrementos humanos tienen un potencial similar en la generación de biogás en comparación con el estiércol de ganado según lo indica el cuadro 3. Esto debido quizás a que las heces humanas y el estiércol del ganado se derivan de la degradación anaerobia en el tracto gastrointestinal, por lo que es posible contener bacterias anaeróbicas fecales. Los componentes de la excreta humana pueden verse en el cuadro 4.

Cuadro 3. Comparación de biogás cedido por distintas materias primas. Fuente: [15].

Fuente	Excreta (kg/día)	% Agua	%Materia seca	Biogás (Nm ³ /kg materia seca)
Vaca	20-30 (28)	80	20	0,023 - 0,040
vaca lechera	20-30 (28)	80	20	0,023 - 0,040
Búfalo	30 - 40 (35)	83	20	0,023 - 0,040
Gallina	0,15 - 0,20 (0,18)	72	28	0,065 - 0,116
Cerdo	3.00 - 4.00 (3.40)	67	9	0,04 - 0,059
Humano	0,10 - 0,40 (0,15)	77	23	0,02 - 0,028

Cuadro 4. Contenido por el excremento humano. Fuente: [15].

Componente	Unidad (por masa húmeda)	Cantidad
Masa seca en la excreción	g/Kg	216
Total de nitrógeno	g/Kg	11
Total de fosforo	g/Kg	4
Potasio	g/Kg	8
Contenido de humedad	%	78
Contenido de materia seca	%	22
pH	-	7 - 9

Basándonos en los datos de el cuadro 3 hay una posibilidad de potencial de biogás por kg de heces humanas llegando a ser igual o más alto que el estiércol y los niveles de metano en el biogás puede llegar al 70%. Otro hecho que hace que las excretas humanas sean una materia prima beneficioso es su pH que es de aproximadamente 7.3 [16], un intervalo de pH óptimo para la producción de biogás. El proceso de generación de biogás a partir de los excrementos humanos es básicamente similar con el sistema de estiércol de ganado vacuno.

Potencial de utilización de excretas humanas para la generación de biogás en la zona rural del Departamento de La Libertad:

Buswell creó una ecuación para estimar los productos de la descomposición anaerobia de material orgánico de la composición química ($C_{450}H_{2050}O_{950}N_{12}S_1$) para la estimación de 10000 personas que producen heces alrededor de 250 gramos/persona / día [17], por lo tanto las heces totales producidos son de 2500 Kg/día. Hay que tener en cuenta que 100 – 400 g de excretas humanas, contienen de 30 – 60 g de materia seca [16].

Según estudios realizado por los “Laboratorios Normon S.A.” del crucero Oasis of the Seas de la empresa naviera Royal Caribbean International, una persona sana genera entre 50 y 100 gramos de sólidos diarios siguiendo una dieta vegetariana, entre 250 y 400 gramos siguiendo una dieta cárnica y entre 100 y 200 gramos siguiendo una dieta mixta [18].

Para este proyecto se ha considerado que la mayoría de las personas siguen una dieta mixta y que al realizar todas las comidas del día (desayuno, almuerzo y cena), y tomando como promedio, los trabajos realizados por Buswell, consideraremos que cada persona al día generará 225 gramos de excreta. La población rural proyectada para el año 2017 es de 468,979 (según lo calculado en el cuadro 2). Hay que tener en cuenta el porcentaje de masa seca, ya que cualquier líquido que contenga el residuo no producirá biogás. En el caso de excretas humanas cerca del 76% del residuo es agua, y solo es aprovechable el 24% de toda la biomasa. También se debe controlar la masa volátil, que es el porcentaje de materia orgánica que contiene la biomasa y la que realmente generará el biogás. Las heces humanas contienen un 80-95% de materia orgánica [18].

En la zona rural del Departamento de La Libertad se producirá, 105,520.28 Kg de excreta por día, lo que representa alrededor de 25,324.87 kg de materia seca. La materia orgánica es el 95% de la materia seca, equivalente a 24,058.62 kg.

El total del carbono presente en la excreta representa el 24% de la materia orgánica, del cual, puede ser degradado aproximadamente el 60 % [16].

Para la estimación del biogás generado a partir de excretas humanas se utilizó la ecuación de Buswell [18]. En el cuadro 5, se muestra la cantidad de metano obtenida a través de las excretas humanas.

Si 1 mol de gas en condiciones normales es de 22.4 litros (16 g de CH_4 es 22.4 litros), a continuación, 2,448.21 kg CH_4 contiene 153,012.84 moles CH_4 y se puede convertir en $153,012.84 \times 22.4 = 342,7487.62$ litros CH_4 .

Así que el metano estimado producido a partir de 105,520.28 kg/día de excretas humanas es 3,427.4876 $Nm^3 CH_4$, respectivamente.

El potencial de la generación de electricidad se obtuvo a partir del potencial de biogás obtenido por cogeneración y de la siguiente ecuación.

$$\epsilon_{Biogás} = E_{Biogás} \times \eta \quad \dots (1)$$

Dónde:

- $\epsilon_{\text{Biogás}}$: Cantidad de electricidad generada (KWh/año)
- $E_{\text{Biogás}}$: Energía en bruto de la conversión del biogás (kWh/año).
- η : Eficiencia global de la conversión del biogás a electricidad (%).

Cuadro 5. Cantidad de metano obtenido de las heces humanas de la población rural por día para el año 2017

	Porcentajes (%)	Cantidad (kg)
Heces humanas (HH)	100%	105520.28
Materia Seca (MS)	24% H.H *	25324.87
Materia Orgánica (MO)	95% M.S**	24058.62
Carbono (C)	24% M.O**	5774.07
Carbono Biodegradada (CB)	60% C**	3464.44
Carbono transformado a metano (CH ₄ -C)	53% C.B**	1836.15
Metano (CH ₄)	16 CH ₄ /12 C**	2448.21

Fuente: * Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero [18]. ** Aplicación del modelo de Buswell [19].

El valor de la eficiencia global de la conversión de biogás a electricidad , varia de 35 – 42% en el caso de plantas de energía con el sistema de turbina grandes y para pequeños generadores se toma el valor de 25% [20]. En este estudio el valor de , se asume como el 30%.

Para calcular la energía en bruto de la conversión del biogás, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Biogás}} = \text{Contenido energético}_{\text{metano}} \times m'_{\text{metano}} \quad \dots(2)$$

Dónde:

- $\text{Contenido energético}_{\text{metano}}$: Poder calorico de metano (KWh/m³).
- m'_{metano} : Cantidad de metano producido en un día (m³/día).

La cantidad del Contenido energético_{metano} se asume como 6 KWh/m³ [20]

La potencia del biogás generado a partir de los excrementos humanos es claramente ventajosa teniendo en cuenta la población rural del departamento de La Libertad y el crecimiento de población. En el cuadro 6 se muestra la proyección del potencial energético producido por excretas humanas.

La obtención de biogás utilizando los excrementos humanos puede proporcionar varios beneficios para zonas rurales, tanto en el término de medio ambiente por ser una fuente de energía alternativa, además de reducir considerablemente las emisiones de CO₂ a la atmósfera y el beneficio económico si se aprovecha el biogás para la generación de electricidad. Considerando que el costo promedio de electricidad es el Perú en el 2017 es de US \$ 0.113 por kWh, esta producción generaría un ingreso a los proyectos que se pudieran realizar, mejorando la sostenibilidad de los mismos.

Cuadro 6. Potencial energético de las excretas humanas de la zona rural del Departamento de La Libertad para los años 2017 al 2022.

Año	Población rural	Metano (Nm ³ /año)	Potencial energético (kWh/año)	E° eléctrica (kWh/año)	US \$/ año
2017	468979	1'251,033	7'506,198	2'251,859	254,685
2018	474841	1'266,670	7'600,022	2'280,006	257,869
2019	480777	1'282,505	7'695,030	2'308,509	261,092
2020	486787	1'298,537	7'791,222	2'337,367	264,356
2021	492872	1'314,769	7'888,615	2'366,585	267,661
2022	499032	1'331,201	7'987,208	2'396,162	271,006

En los procesos de descomposición natural, la biomasa libera metano (CH₄), el metano es un gas con consecuencias severas para el efecto invernadero, teniendo un potencial de calentamiento global de hasta 23 veces mayor que el del CO₂ [21]. Por ello, es medioambientalmente razonable su aprovechamiento energético.

En cuanto a la combustión, 1 m³ de biogás representa un equivalente de 5.96 kW. Por cada kW de energía producido por biogás en lugar de diésel, por ejemplo, se reduce 0.34 kg de CO₂ emitidos a la atmósfera [22]. De esta forma para la producción diaria de biogás en las zonas rurales de la región La Libertad para el año 2017, que es de 3,427.49 Nm³ representa una producción anual de 1251032.98 Nm³ de biogás. Para esta producción se logra obtener 7,506,197.90 kW de energía usada para combustión en vez de diésel, lo cual reducirá 2,552,107.29 kg de CO₂ emitidos a la atmósfera.

Tomando la relación de generación de electricidad por m³ de biogás del cuadro 6, 1 m³ de biogás produce 1.80 kWh de electricidad. Si se toma en cuenta que una vivienda típica consume un promedio de 2.5 kWh/día, lo que representa cerca de 1MWh/año [23]. Si se visualizan esos números en un ambiente rural, donde uno de los principales problemas es el costo asociado a la entrega de electricidad a los hogares y las características técnicas en cuanto a calidad del suministro proporcionado, esta solución implicaría socialmente hablando un beneficio local significativo, porque con la generación de electricidad a través de excretas humanas se puede cubrir el 72 % del consumo diario de electricidad por vivienda.

Conclusión

La obtención de biogás utilizando excretas humanas se constituye en una alternativa energética que permitirá la utilización de un recurso no explotado y a su vez en un ahorro económico para la población. Teniendo en cuenta la población rural del Departamento de La Libertad para el año 2017 se puede generar 1'251,033 Nm³ de biogás anual con un potencial energético de 7'506,198 kWh si se aprovecha el total de excretas humanas, que puede transformarse en producción anual de 2'251,859 kWh de electricidad valorizado en US \$ 254,685. La disponibilidad de este recurso energético traerá consigo una mejora en el desarrollo de las poblaciones rurales en general.

Por otro lado, el empleo del biogás disminuirá el nivel de contaminación si se usa como combustible en vez de diesel, ya que 1'251,033 Nm³ de biogás puede reducir 2,552,107.29 kg de CO₂ emitidos a la atmósfera.

Se recomienda extender la investigación y realizar un estudio de factibilidad con el fin de determinar la viabilidad del proyecto en la zona rural en la que se aplique tomando en cuenta las características específicas de la zona en evaluación.

Referencias

- [1] C. Lalander, G. Hill y B. Vinnerås, "Hygienic quality of faeces treated in urine diverting vermicomposting toilets," *Waste Management*, Vol. 33, n° 11, pp. 2204-2210, 2013.
- [2] D. Mara, "Pits, pipes, ponds and me," *Water Research*, Vol. 47, n° 7, pp. 2105-2117, 2013.
- [3] L. Dellström, "A psychosocial analysis of the human-sanitation nexus," *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 25, n° 3, pp. 335-346, 2005.
- [4] K. Wignarajah, E. Litwiller, J. Fisher y J. Hogan, "Simulated human faeces for testing human waste processing technologies in space systems," SAE Technical paper, Vol. 1, n° 1, pp. 2180-2189, 2006.
- [5] R. Francelys, J. Pickford y R. Reed, *A guide to the development of on-site sanitation*. England: Macmillan, 1992.
- [6] J. Salazar, C. Amusquivar, J. Llave y C. Rivasplata, "Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna," presentado en el XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Puno, Perú, 2012.
- [7] J. Silva. (2012, Junio 25). *Tecnología del biogás* (En línea). Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>
- [8] L. A. Kristoferson and V. Bokalders, *Renewable Energy Technologies - their application in developing countries*: ITDG Publishing, 1991.
- [9] RPP Noticias. (2015, Agosto 12). *Planta genera electricidad limpia con biogás en la Amazonía*. (En línea). Disponible en: <http://rpp.pe/economia/economia/planta-genera-electricidad-limpia-con-biogas-en-la-amazonia-noticia-824378>.
- [10] F. Carrasco (2010, Agosto 21). *Convierten excremento humano en biogás*. (En línea). Disponible en: http://www.australtemuco.cl/prontus4_noticias/site/artic/20100818/pags/20100818000345.html.
- [11] OEFA. (2014, Febreo 16). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. (En línea). Disponible en: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827.
- [12] INEI. (2012, Diciembre 13). *Mapa de déficit de agua y saneamiento básico a nivel distrital 2007*. (En línea). Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0867/libro.pdf.
- [13] INEI. (2008, Octubre 22). *Crecimiento y distribución de la población en el Perú 2007*. (En línea). Disponible en: http://censos.inei.gob.pe/censos2007/documentos/Resultado_CPV2007.pdf.
- [14] INEI. (2015, Noviembre 18). *Mapa de Pobreza Provincial y Distrital 2013*. (En línea). Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1261/Libro.pdf
- [15] R. Otterpohl, "New technological development in ecological sanitation" presented at the 2nd international symposium on ecological sanitation, Hamburg, Germany, 2003.
- [16] P. Haq y E. Soedjono. (2010). *Human manure potential as biogas producer*. (En línea). Disponible en: <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-11072-Paper.pdf>
- [17] E. Febrianto y S. Priyono, "Studi pemantaatan feses (kotoran manusia) sebagai bahan baku alternatif energi terbarukan," *TELAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, Vol. 30, n° 1, pp. 19-24, 2012.
- [18] A. Bosch. (2011). *Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero*. (En línea). Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13613/PFC_BOSCH_MARTI_ADRI%C3%80.pdf.
- [19] R. Baquerizo, J. Pagés y I. Pereda I, "El modelo de Buswell. Aplicación y Comparación. Principales factores que influyen en su aplicación," *Gestión Ambiental*, Vol. 2, pp. 1-22, 2016.
- [20] M. Poeschl, S. Ward y P. Owende, "Prospects for expanded utilization of biogas in Germany," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, pp. 1782-1797, 2010.

- [21] O. Campero, G. Kristinc, T. Cuppens y P. Mizme, "Implementación del programa de mitigación de los efectos negativos del gas metano CH₄, con la ejecución de acciones integrales de energías renovables y medio ambiente en el área rural de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz," *Tecnologías en Desarrollo*, pp. 1-36, 2008.
- [22] M. Kumar, S. Humar y M. Poonia, "Methane, carbon dioxide and nitrous oxide reduction through the application of biogas technology," *Indian journal of Environmental Health*, Vol. 42, n° 3, pp. 117-120, 2000.
- [23] M. Martínez, "Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato," *Nova Scientia*, Vol. 7, n° 15, pp. 96-115, 2015.