

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA
DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**DISEÑO E INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR TIPO
LAGUNA CUBIERTA DEL ESTABLO DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE
MENDOZA, CHACHAPOYAS, AMAZONAS**

Autor: Bach. Perci Salazar Salazar

Asesor: Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA
DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**DISEÑO E INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR TIPO
LAGUNA CUBIERTA DEL ESTABLO DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE
MENDOZA, CHACHAPOYAS, AMAZONAS**

Autor: Bach. Perci Salazar Salazar

Asesor: Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2017

DEDICATORIA

A Dios por darme fuerzas para seguir adelante y ser mi guía en el camino al éxito.

A mis padres por su apoyo incondicional en todo momento, dándome sabios consejos, coraje y recordándome día a día que con esfuerzo y dedicación todo obstáculo se vuelve posible.

A mis hermanos que gracias a ellos hicieron renacer en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Perci

AGRADECIMIENTO

A Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

A mi Asesor: Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, por su apoyo y orientaciones para la realización de la presente tesis.

Al Proyecto “Creación del Centro de Investigación en Climatología y Energías Alternativas” (PROCICEA) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), por el apoyo logístico brindado para la presente tesis.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, que me brindaron sus conocimientos para formarme profesionalmente.

Perci.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI

RECTOR

Dr. MIGUEL ANGEL BARRENA GURBILLÓN

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN

VICERRECTORA DE INVESTIGACION

Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM-A) que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada **“DISEÑO E INSTALACIÓN DEL BIOGIDESTOR TIPO LAGUNA CUBIERTA DEL ESTABLO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS, CHACHAPOYAS, AMAZONAS”**, del tesista egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la UNTRM-A:

Bach. PERCI SALAZAR SALAZAR

El docente de la UNTRM-A que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones para su posterior sustentación.

Chachapoyas, 10 de marzo de 2018.

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
PROFESOR PRINCIPAL DE LA FICIAM-UNTRM-AMAZONAS

JURADO EVALUADOR

M.Sc. ELÍ PARIENTE MONDRAGÓN
Presidente

M.Sc. ROSALYNN YOHANA RIVERA LÓPEZ
Secretaria

M.Sc. LENIN QUIÑONES HUATANGARI
Vocal

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	iv
JURADO EVALUADOR	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MATERIAL Y METODOS	11
2.1. Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	11
2.2. Componentes del biodigestor tipo laguna cubierta	12
- Separador de sólidos	12
- Laguna cubierta	12
- Laguna para biol	12
- Cámara de secado de lodos de fondo	13
- Sistema de purificación y control de biogas	13
2.3. Variables de diseño de la laguna cubierta	13
a) Tipo de suelo	13
b) Talud	14
c) Corona del biodigestor	15
d) Profundidad	15
e) Tiempo de retención hidráulica y dimensionamiento de la laguna cubierta	15
f) Tiempo de retención hidráulica mínimo	15
g) Volumen del biodigestor	16
h) Material de la cobertura	16
	17

i) Cerco perimétrico	
III. RESULTADOS	18
3.1. Diseño del sistema de producción de biogas y bioabonos	18
3.1.1. Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	18
3.1.1.1. Diseño de la cámara del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	18
3.1.1.2. Diseño de la cúpula del BTLC	23
3.1.1.3. Área de geomembrana para el BTLC	25
3.1.2. Diseño de la laguna para almacenar biol	26
3.1.3. Diseño de la poza para secado de lodos de fondo (biosol)	29
3.1.4. Diseño del sedimentador	30
3.2. Construcción e instalación del sistema de producción de biogas y bioabonos	32
3.2.1. Construcción del sedimentador	32
3.2.2. Construcción de la poza e instalación del biodigestor tipo laguna cubierta	32
3.2.3. Construcción e instalación de la laguna para almacenar biol	34
3.2.4. Cámara para secado de lodos de fondo	36
3.3. Operación del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	37
3.3.1. Carga del BTLC	42
3.3.2. Recirculación y extracción de biol del BTLC	43
3.3.3. Parchado de la geomembrana del BTLC	45
3.3.4. Extracción de biosol	45
3.3.5. Mantenimiento del sedimentador	46
3.3.6. Correcciones en la laguna para almacenar biol	48
3.3.7. Evacuación del contenido del BTLC	49
IV. DISCUSIÓN	54
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química del biogas.	2
Tabla 2. Dimensiones de biodigestores de membrana de caucho AQFLEX.	13
Tabla 3. Inclinación para taludes en diferentes tipos de suelo (EPA, 2001).	14
Tabla 4. Propiedades mínimas de la geomembrana (SEMARNAT <i>et al.</i> , 2010).	16

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Combustión del biogas en la hornilla de una cocina.	2
Figura 2. Biodigestor tipo laguna cubierta. Fuente: Moncayo, 2014.	3
Figura 3. Inclinaciones recomendadas de taludes, en función de los tipos más comunes de suelo (L’Institut de L’Elevage, 1996).	15
Figura 4. Dimensiones de la cámara del biodigestor.	21
Figura 5. Vista superior y lateral de la cámara del biodigestor.	22
Figura 6. Cúpula del biodigestor.	23
Figura 7. Dimensiones de la laguna de almacenamiento del efluente.	27
Figura 8. Vista superior y lateral de la laguna de almacenamiento de efluente.	28
Figura 9. Dimensiones de la poza para secado de lodos de fondo.	29
Figura 10. Dimensiones del sedimentador.	31
Figura 11. Esquema del sedimentador.	31
Figura 12. Sedimentador para alimentación del BTLC.	32
Figura 13. Construcción de la cámara del BTLC.	33
Figura 14. Cartel de obra. Salida de biogas del digestor. Electrobomba de 2 hp para recircular el sustrato en fermentación dentro del digestor	34
Figura 15. Excavación y reforzado de la laguna para almacenar biol.	35
Figura 16. laguna terminada para almacenar biol. tubería de rebose de biol del digestor. tubería de succión de la bomba de 2 hp para extraer biol.	35
Figura 17. Cámara para secado de lodos de fondo del digestor.	36
Figura 18. Ubicación de los componentes del sistema de producción de biogas en la UNTRM, Amazonas – Perú.	37
Figura 19. Piso de establo de la UNTRM y canaleta de conducción de la mezcla estiércol:agua al sedimentador.	38
Figura 20. Recolección del rumen en el Camal Municipal de Chachapoyas.	39

Figura 21. Inoculación con rumen en el BTLC.	39
Figura 22. Desatoro de la tubería de alimentación del BTLC.	40
Figura 23. Esquema del sistema de producción de biogas y bioabonos con BTLC.	41
Figura 24. Esquema de desniveles entre los componentes del sistema de producción de biogas y bioabonos con BTLC.	42
Figura 25. Cebado de electrobombas para recircular biol.	42
Figura 26. Reparación de tuberías.	43
Figura 27. Parchado de la geomembrana del biodigestor.	44
Figura 28. Llaves para extracción de biosol del BTCL.	45
Figura 29. Secuencia de retiro de arena del sedimentador.	45
Figura 30. Secuencia de paso de la mezcla estiércol:agua por el sedimentador.	46
Figura 31. Evacuación de la laguna de biol y cambio de tubos.	47
Figura 32. Poza antes y después de ser rehabilitada para almacenamiento de biol.	47
Figura 33. Evacuación total del BTLC.	48

RESUMEN

Se diseñó e instaló el sistema de tratamiento de efluentes del establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), para procesar estiércol de ganado vacuno. El biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) de 170 m³, fue excavado en el suelo e impermeabilizado con geomembrana, para procesar el estiércol de 40 vacas que producen 600 kg de estiércol/día, en 126 m³, con tiempo de retención hidráulico de 35 días. El BTLC tiene forma de tronco de pirámide invertida, de 3 m de profundidad y talud de 45°. La cúpula del biodigestor tiene 1,8 m de alto y 12 x 9 m en su base (borde superior del BTLC), almacenará 133,56 m³ de biogas. El volumen libre en el BTLC es de 44 m³; la capacidad de almacenamiento del sistema será de 177,56 m³, que equivale a 4,03 días de producción de biogas. La laguna para biol tiene forma de tronco de pirámide invertida impermeabilizada con geomembrana de 51,6 m³, de 1,5 m de profundidad y talud de 45°. La laguna para almacenar lodos de fondo tiene forma de tronco de pirámide invertida, de 113,39 m³, de 2,0 m de profundidad, talud de 45°, reforzada con canto rodado y concreto. El biogas producido se empleará como combustible ecológico. Los bioabonos servirán para mejorar los suelos e incrementar la producción de los pastos para el ganado. La operación del sistema de tratamiento de efluentes contribuirá a la sostenibilidad de la actividad del establo.

Palabras clave: biogas, energías renovables, biodigestor tipo laguna cubierta.

ABSTRACT

The effluent treatment system of the stable of the Toribio Rodríguez de Mendoza National University of Amazonas (UNTRM) was designed and installed to process cattle manure. The covered lagoon biodigester (CLB) of 170 m³ was excavated in the soil and waterproofed with geomembrane, to process the manure of 40 cows that produce 600 kg of manure/day, in 126 m³, with hydraulic retention time of 35 days. The CLB has the shape of an inverted pyramid trunk, 3 m deep and 45° slope. The dome of the biodigester is 1,8 m high and 12 x 9 m at its base (upper edge of the CLB), it will store 133,56 m³ of biogas. The free volume in the CLB is 44 m³; the storage capacity of the system will be 177,56 m³, equivalent to 4,03 days of biogas production. The lagoon for biol has the shape of an inverted pyramid trunk waterproofed with 51,6 m³ geomembrane, 1,5 m deep and 45° slope. The lagoon for storing bottom mud has the shape of an inverted pyramid trunk, 113,39 m³, 2,0 m deep, 45° slope, reinforced with pebbles and concrete. The biogas produced will be used as an ecological fuel. The bioabonos will serve to improve the soils and increase the production of pastures for livestock. The operation of the effluent treatment system will contribute to the sustainability of the stable's activity.

Key words: biogas, renewable energies, covered lagoon type biodigester.

I. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles o nucleares son no renovables debido a que sus fuentes no son “rellenadas” por la naturaleza, al menos no en una cantidad de tiempo aprovechable. En contraste, los portadores de energía renovable son “rellenados” por procesos naturales a una velocidad comparable con su consumo por el hombre (Jäger *et al.*, 2014).

La energía renovable es producida de manera natural, repetitiva y persistente en el medio ambiente en cualquier lugar de la Tierra. La energía renovable incluye la radiación solar, el viento, la biomasa (plantas cosechadas, estiércoles), ríos (potencia hídrica), las mareas y calor geotérmico (Twidell y Weir, 2015). El Perú tiene un gran potencial de energías renovables, su aprovechamiento reducirá el empleo de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Las tecnologías para su aplicación están disponibles y contribuirán a mejorar la calidad de vida de sus usuarios y la salud del planeta.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico degradativo y complejo por el número de reacciones bioquímicas que ocurren y la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. En este proceso, parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogas, por un consorcio de bacterias sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. La digestión anaeróbica convierte gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (Varnero, 2011).

Estudios bioquímicos y microbiológicos dividen la digestión anaeróbica de la materia orgánica en cuatro etapas: a) Hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) por enzimas extracelulares producidas por microorganismos acidogénicos o fermentativos, para producir compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga); b) Acidogénesis, donde los productos de la hidrólisis son metabolizados por bacterias acidogénicas para producir ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios; c) Acetogénesis, que transforma los ácidos grasos de cadena corta en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de microorganismos

acetogénicos; d) Metanogénesis, en esta última etapa, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂ (Varnero, 2011).

Los combustibles son sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que mezcladas con el oxígeno del aire y en presencia de una chispa o fuego se combustionan. Si la cantidad de oxígeno es insuficiente, la combustión será parcial, produciendo llama amarilla, CO, CO₂, agua, humos y hollín; en cambio si hay suficiente cantidad de oxígeno, la combustión será total generando llama azul, CO₂ y agua. El biogas es una mezcla de diferentes gases (Tabla 1) cuyo principal componente es el metano (CH₄). La combinación del biogas con el aire es comburente y arde con llama azul (indicador de combustión total) en condiciones ambientales (Figura 1), que permite tener la cocina y sus utensilios libres de tizne y humos irritantes, por lo que es un combustible adecuado para cocina doméstica.

Tabla 1. Composición química del biogas.

Componente	Formula	Porcentaje (v/v)
Metano	CH ₄	40 -70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 60
Hidrógeno	H ₂	0,1
Nitrógeno	N ₂	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O ₂	0,1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,1

Fuente: Blanco *et al.*, 2011, citado por Cepero *et al.*, 2013.



Figura 1. Combustión del biogas en la hornilla de una cocina.

Un biodigestor es un sistema natural o artificial cerrado, donde ocurre la digestión anaeróbica para transformar biomasa o materia orgánica degradable en biogas y/o biofertilizantes. Todos los materiales orgánicos pueden ser fermentados o digeridos; sin embargo, solo sustratos líquidos u homogéneos como las heces y orina de ganado, de cerdos, de aves, aguas negras, desechos vegetales, residuos de cosechas, entre otros pueden ser usados en plantas para producir biogas. Normalmente, el biogas producido por un digestor puede ser usado tal como está, de la misma forma que cualquier otro gas combustible; sin embargo, es posible y deseable que se realice un tratamiento posterior para remover gases no deseables o impurezas (Hidalgo *et al.*, 2010).

El biodigestor tipo laguna cubierta, consta de una poza excavada en el suelo con forma de tronco de pirámide invertida, con todos sus lados y fondo recubiertos con material plástico impermeable como la geomembrana de PVC o de polietileno; con el que también se cubre la poza como una tapa (que constituye la cúpula) para asegurar la condición anaeróbica necesaria. La entrada de la materia prima ocurre por gravedad o uso de bombas. Normalmente grandes flujos de estiércol drenan hacia el biodigestor donde los residuos serán procesados anaeróbicamente por alrededor de 40 días. En estos biodigestores, el biogas rico en metano es almacenado en la parte superior (cúpula) del biodigestor, de donde es distribuido a través de tuberías al punto final de utilización del biogas, que puede ser para calefacción o combustible de un motogenerador de electricidad. El exceso de biogas puede conducirse a una antorcha donde será quemado, produciendo dióxido de carbono y agua; este CO₂ en comparación al metano, es prácticamente inocuo, pues tiene 21 veces menos poder contaminante (considerado en una escala de tiempo de 100 años) y por lo tanto disminuye el potencial de generación de gases efecto invernadero del proceso productivo (Moncayo, 2014).



Figura 2. Biodigestor tipo laguna cubierta. Fuente: Moncayo, 2014.

Los principales motivos para implementar la tecnología del biogas son (Silva, 2002):

- Obtener una fuente de energía económica que permita disminuir costos asociados al consumo de la energía eléctrica o sistemas de gas convencionales.
- Los sistemas de producción de biogas reducen los olores ofensivos especialmente en zonas donde se producen y manejan grandes cantidades de estiércol de ganado; porque los ácidos orgánicos volátiles que producen compuestos generadores de olor, son consumidos por bacterias que producen metano.
- En el proceso de digestión anaerobia, el nitrógeno orgánico del estiércol se convierte en gran proporción en amoníaco, el constituyente básico del fertilizante comercial, que es fácilmente disponible y utilizado por las plantas.
- El efluente del digester es un producto más uniforme y manejable que el estiércol no tratado. La alta cantidad de amoníaco facilita su utilización por los cultivos y permite mejorar las propiedades físicas de los suelos. Una aplicación apropiada del efluente del digester reduce la contaminación de aguas superficiales o subterráneas.
- El calentamiento que ocurre en los digestores reduce la población de patógenos rápidamente en pocos días.

La temperatura de la mezcla en el digester es un factor importante para la eficiencia del proceso de digestión. La mayoría de las bacterias anaeróbicas funcionan mejor en el rango de 30 a 35 °C y esta es la temperatura óptima para la producción de biogas. La temperatura del digester siempre debe estar por encima de 20 °C, porque a temperaturas menores, se produce poco biogas y por debajo de 10 °C la digestión cesa completamente. Tiempos de retención de 10 a 25 días de la mezcla en el digester son usuales en la mayoría de países tropicales. Si las temperaturas ambientes son altas, por ejemplo, en promedio entre 30 y 35° C, puede ser suficiente un período de retención de sólo 15 días. En climas más fríos, son comunes periodos de retención más largos, de 80 a 90 días. En el caso de desechos de ganado porcino que son ricos en ácidos volátiles se necesitan de 10 a 15 días; los excrementos de bovinos que contienen compuestos de difícil descomposición requieren mínimo de 20 días de digestión (Silva, 2002).

El periodo de retención o tiempo de retención hidráulico se expresa en días, contados desde que el biodigester se ha cargado a su volumen de trabajo con la mezcla estiércol:agua, hasta que se observe su cúpula completamente inflada por el biogas producido. El tiempo de retención hidráulico en función de la temperatura del ambiente

donde está instalado el biodigestor se puede calcular con la ecuación logarítmica: $TRH = -44,705 \ln(T) + 160,394$; que modela el tiempo de retención hidráulico (TRH: días) para la producción de biogas en función de la temperatura (T: °C) ambiente, con un ajuste $R^2 = 0,924$ (Barrena *et al.*, 2013).

La digestión anaeróbica de la materia orgánica produce biogas y dos abonos orgánicos: biol y biosol. El biol es el efluente líquido del biodigestor donde se produce biogas; sale por la tubería de rebose que mantiene un volumen de trabajo constante. El biol es un excelente abono foliar que sirve para que las plantas estén verdes y den buenos frutos como papa, maíz, haba, hortalizas y frutales. El biol nutre, recupera y reactiva la vida del suelo y fortalece la fertilidad de las plantas. Es un abono que estimula la protección de los cultivos contra el ataque de insectos y enfermedades y permite sustituir una gran parte de fertilizantes químicos (Mosquera, 2010).

Biosol o biosólido es el lodo de fondo que se extrae del biodigestor como purgas, a través de una tubería ubicada a ras del fondo en cuyo extremo exterior tiene una llave de paso, que se abre cada seis meses, para mantener su operación normal. Fresco o seco, se lo utiliza como abono de fondo (aplicación al suelo durante su preparación). Este abono posee una diversidad de nutrientes fácilmente asimilables por los tejidos vegetales, la cantidad de estos nutrientes depende de las fuentes de materia orgánica utilizadas en su elaboración, además también posee hormonas vegetales que estimulan el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tejedo y Yopán (2014), en Pomacochas, Región Amazonas, produjeron biogas a partir de estiércol de vacuno en biodigestor tubular de 12 m³ de geomembrana de PVC, cargado con 9 m³ de mezcla estiércol: agua (1:5); cuya cúpula puede almacenar 3 m³ de biogas. Para mantener la producción de biogas se alimentó diariamente el biodigestor con 200 L de mezcla estiércol: agua (1:5). La presión de operación del sistema fue de 4 cm de agua. Para adaptar el motor a biogas hicieron un dispositivo en forma de T, con accesorios de PVC de ½” y una llave de compuerta de bronce de ½” para regular la alimentación del biogas al motor. Para el ingreso de la mezcla biogas-aire al carburador se empleó accesorios de PVC de 1”. El grupo electrógeno a biogas produjo 244 W (24,4% de la potencia generada por el mismo motor a gasolina) para el encendido de un foco de filamento de 100 W y 8 focos ahorradores de 18 W cada uno. Adicionalmente, adaptaron con un dispositivo similar, el motor de 9 hp de una picadora de pasto que operó a biogas

sin problemas. Para ambos motores, el arranque lo hicieron con gasolina y luego lo pasaron a operación con biogas.

La cantidad de biogas esperada de un digestor con una eficiencia razonable está relacionada con el contenido de sólidos volátiles. Funk (2007), menciona que el estiércol de una vaca lechera puede generar alrededor de 2,57 m³ de biogas. Por otro lado Pizarro *et al.* (2006), mencionan que la producción de biogas es alrededor de 2 m³/vaca /día. En establos en México se ha reportado desde 1,4 a 2,08 m³/vaca/día por lo cual la producción puede depender de las condiciones particulares de cada lugar y cada establo. En lo que respecta a la obtención de energía eléctrica de acuerdo al biogas producido, Van Horn *et al.* (1994), mencionan que un establo de 1000 vacas que generan 2000 m³ de biogas/día podrían generar hasta 2141 kWh/día.

Para el cálculo de energía eléctrica, se debe conocer que el valor calorífico del biogas con 65% de metano es de 7,0 kWh/m³ (Varnero, 2011) o 5000 kcal/m³ (Moncayo, 2014). El potencial económico proveniente del aprovechamiento del biogas generado en las explotaciones pecuarias para la generación de energía eléctrica, representa uno de los mercados más importantes de energías renovables en México. Asimismo, representa un potencial energético equivalente al 40% de la capacidad nucleoelectrica instalada (Sener, 2006).

Según Nennich *et al.* (2005), una vaca en producción hace alrededor de 75,2 kg de estiércol/día, una vaca seca 38,6 kg/día, una vaquilla 24,5 kg/día y un becerro 12,4 kg/día. Tarchitsky (2003), menciona que una vaca en producción genera 76 L de estiércol (45 kg de material fecal y 25 L de orina). Sin embargo, DEC (2006), presenta un valor de 50 L/vaca/día con un rango de 30-100 L/vaca/día ya que las cantidades de estiércol varían de acuerdo al peso del animal y las condiciones de crianza.

En Tacna construyeron un biodigestor y lo cargaron hasta el límite de su capacidad líquida equivalente a 1677 litros (429 kg de estiércol + 1257 litros de agua) dejándolo reposar por 30 días. Evaluaron su funcionamiento cargándolo diariamente con la proporción de 3:1, durante marzo y abril del 2010, controlaron el pH del lodo, producción de biogas diaria, producción de biol diaria, la temperatura de la manga en tres puntos (entrada, al medio y a la salida) y la temperatura ambiental. Se quemó biogas filtrado y sin filtrar pero no se halló diferencia en la llama, considerando que el filtro generaba pérdidas de flujo

de biogas por lo que recomiendan su instalación en forma vertical y no horizontal (Schlaefli, 2010).

Rodríguez (2012), evaluó el potencial productivo del bagazo cervecero para la generación de biogas bajo condiciones controladas. Realizó la caracterización fisicoquímica del residuo, el tratamiento del bagazo acondicionado (BA) y comparó con un tratamiento a base de estiércol de bovino (EB). Ambos tratamientos fueron evaluados en un biodigestor de régimen estacionario, determinando: tiempo de retención hidráulico (TRH) de 144 días para BA y de 98 días para EB. El volumen total promedio de producción fue 650,14 litros en los 144 días para BA y de 392 litros en 98 días para EB, los cuales representan un volumen de producción de 0,0144 m³/kg y 0,0087 m³/kg respectivamente, siendo los volúmenes máximos de producción de 27,7 L de biogas para BA y de 21,5 L de biogas para EB, a partir de volúmenes de mezcla estiércol con agua de 45 L.

En Ecuador diseñaron un biodigestor modelo chino o de domo fijo, a nivel de laboratorio, para tratar desechos orgánicos provenientes de ganado vacuno para la obtención y conducción de biogas, como energía renovable, para lo cual se eligió 5 vacas al azar, de las cuales se recogió el estiércol en baldes de 5 litros. Determinaron que para obtener 5 m³ de biogas son necesarios 312 kg de estiércol (Lara e Hidalgo, 2011).

La laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad es una tecnología desarrollada por el Centro de Tecnología de Biogas de Hanoi (CTBH, 2011) para grandes volúmenes de residuales y una cantidad de sólidos de alrededor del 3%, con bajos costos de construcción y operación. En el proyecto se construyeron o repararon en menor medida 69 biodigestores, de ellos: nueve fueron tubulares plásticos; uno de cúpula móvil (modelo hindú); dos de lagunas anaeróbicas cubiertas de 300 m³ (tecnología vietnamita); y los 57 restantes fueron de cúpula fija (Cepero *et al.*, 2011).

Salazar *et al.* (2012), en Tacna diseñaron, construyeron y evaluaron un biodigestor familiar de 2 m de largo, de manga de polietileno, ubicado en una zanja con paredes de adobe, acolchonado por una manta de plástico y revestido por un cobertor negro lo que ayuda a mantener cálido el sistema. Alimentaron el biodigestor con estiércol fresco de ganado ovino. El tiempo de retención inicial fue de 30 días, produciendo posteriormente biogas en forma diaria con un promedio de 400 litros/día con un rango de temperatura del biodigestor entre 30 a 40 °C oscilando la temperatura ambiente entre 20 y 30°C durante

los meses de evaluación. La producción de biol fue de 40 litros/día en promedio y adaptaron una cocina a kerosene para comprobar la utilidad del biogas como combustible.

Cueva (2012), produjo biogas a partir de estiércol porcino y residuos orgánicos, por fermentación semicontinua. La experimentación se llevó a cabo en el INPREX, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. Diseñó y construyó un biodigestor tipo chino de 250 litros. La máxima producción diaria de biogas fue de 35240 cm³ y la mínima de 4948 cm³ a los 58 días del inicio de la fermentación.

En la ciudad de Chachapoyas (Amazonas), se realizó una investigación para determinar los parámetros para producir biogas a escala de laboratorio con estiércol de ganado vacuno, agua de desagüe y cáscara de papa; en la que se obtuvo a los 45 días 195 mL de biogas en un digestor de 1750 mL que contenía 583 g de estiércol, lo que equivale al 11,14% de biogas con respecto al volumen del digestor y 33,45% de biogas con respecto al volumen del estiércol, demostrándose que se puede producir combustible ecológico a partir de efluentes contaminantes del medio ambiente (Barrena *et al.*, 2010).

En 2010, se construyó un biodigestor anaerobio tipo laguna cubierta de 67 m³, de geomembrana de PVC. Cuenta con tubería de PVC para conducción de biogas y recirculación de biol. El proceso inició con el acopio y transporte del contenido gástrico ruminal bovino (rumen) y con la medición de humedad, sólidos volátiles y cenizas. Se alimentó con una mezcla rumen:agua en proporción 4:1. Se agitó hidráulicamente con una bomba autocebante. Durante 90 días se monitoreó el oxígeno disuelto, pH y la temperatura. La DQO se determinó al inicio, 30 y 60 días y la composición del biogas a los 30, 60 y 90 días. Los resultados obtenidos fueron humedad, 87,85%; sólidos volátiles, 85,56%; y 14,44% de cenizas. Las concentraciones en % volumen para el CH₄ y CO₂ fueron 62,80 y 30,75, respectivamente. La concentración de H₂S fue de 15,96 ppm. Los valores de DQO inicial fueron de 60000 mg/L y a los 60 días de 5150 mg/L. Obtuvieron una degradación del 91% de la materia orgánica (Laines y Sosa, 2013).

Según la FAO (2014), la actividad ganadera es una de las principales fuentes emisoras de gases de efecto invernadero (GEI): óxido nitroso, metano y dióxido de carbono. La fermentación entérica o producción de metano por el proceso digestivo de los rumiantes, aproximadamente 46% de las emisiones provienen de la producción de leche y 43% de la

producción de carne de bovino. América Latina y el Caribe representan la mayor proporción de emisiones de GEI por actividades pecuarias, aproximadamente 1,3 gigatoneladas anuales, lo que se traduce en un 18,3% de las emisiones mundiales. Principalmente se atribuye a la producción especializada de carne de bovino y el cambio de uso de suelo, reducción de la superficie forestal para el establecimiento de pastizales y tierras agrícolas para producción de forrajes.

Según la FAO, en el 2012 México tenía 5,5 % del hato lechero de América Latina y el Caribe. Desde la perspectiva económica, las emisiones de óxido nitroso, metano y dióxido de carbono son pérdidas de nitrógeno, energía y materia orgánica del suelo, es decir, reflejan una menor eficiencia de los alimentos y mayores costos de producción. Entre las estrategias para reducir la emisión de GEI en la actividad ganadera destacan mejorar la calidad de la alimentación, forrajes menos fibrosos y fórmulas balanceadas, permitiendo mejorar la digestión y aprovechamiento de los nutrientes por parte de los animales, reduciendo la generación de metano a través de una menor fermentación entérica y producción de estiércol (Núñez, 2012).

Otra estrategia es la implementación de tecnologías para el procesamiento del estiércol, reutilizar los nutrientes y el metano generado a través de la digestión anaeróbica en biodigestores; el procesamiento permite generar biogas y abonos orgánicos que reducen las emisiones atmosféricas. Adicionalmente, el uso del gas y el abono producido permite reducir costos de fertilización para la producción de forrajes y el consumo energético en los establos, lo que a su vez contribuye a la disminución de emisiones de óxido nitroso de los fertilizantes y dióxido de carbono de los combustibles fósiles para la generación de energía. Por lo tanto, la reducción en la emisión de los GEI puede lograrse a través de la adopción de mejores prácticas productivas, que no necesariamente implican un cambio de sistema de producción. Adicionalmente, la implementación de mejores prácticas trae consigo un incremento en la productividad de leche por vientre y peso en los animales para producción de carne, por lo que existe viabilidad económica en la implementación de tecnologías y reducción de la huella de carbono (Núñez, 2012).

El diseño e instalación y la futura operación del sistema de tratamiento de efluentes del establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), permitirá procesar todo el estiércol del ganado vacuno que allí se cría, en el biodigestor tipo laguna cubierta, en cuya cúpula se almacenará el biogas producido, que

se empleará como combustible para cocina, lámpara de camiseta y motor de combustión interna. El biol y el biosol producidos junto con el biogas, se emplearán como fertilizantes orgánicos para incrementar la producción de los pastos, con lo cual se estará realizando un reciclaje de nutrientes. Estos bioabonos también se podrán comercializar. En consecuencia, la operación de este sistema de tratamiento de efluentes contribuirá a la sostenibilidad de la actividad pecuaria y reducirá la emisión de GEI.

La presente investigación tuvo como objetivo general: Realizar el diseño e instalación del biodigestor tipo laguna cubierta del establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Amazonas.

Los objetivos específicos de la presente investigación fueron:

- Establecer la cantidad de estiércol de ganado vacuno disponible en el Establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza.
- Realizar el diseño de cada componente del sistema de producción de biogas y bioabonos en base a la cantidad de estiércol disponible: biodigestor tipo laguna cubierta, laguna para almacenar biol, cámara para secado de lodos de fondo y del sedimentador.
- Estimar el volumen de biogas y de biol que producirá el biodigestor tipo laguna cubierta.
- Acompañar en la instalación de cada componente diseñado del sistema de producción de biogas y bioabonos para tratar el efluente del Establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

En el establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) se cría 40 vacas raza Jersey de pedrigree, por lo que se ha diseñado un sistema para procesar el estiércol y reducir su impacto ambiental produciendo biogas y bioabonos (biol y biosol). Este sistema consta de: sedimentador, biodigestor tipo laguna cubierta, laguna para biol y cámara para secado de lodos de fondo.

2.1. Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

El biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) consiste de una laguna excavada en el suelo con forma de tronco de pirámide invertida, impermeabilizada con un material polimérico que recibirá la mezcla estiércol:agua para su tratamiento anaeróbico; cuya superficie se cubre con una manta también de material polimérico, para asegurar la anaerobiosis y atrapar el biogas que se producirá, el que luego será conducido hacia el área donde se le empleará como combustible. El BTLC es operado a volumen constante para maximizar el tratamiento biológico, producción de metano y control de olores. Para el caso de los BTLC se podrá considerar hasta una relación mínima agua sólidos de 3:1 y máxima de 9:1 (SEMARNAT *et al.*, 2010).

El pH permitirá considerar en el diseño, la alcalinidad o acidez del influente, ya que estos, en caso de no encontrarse en un intervalo óptimo, limitarán o en su caso inhibirán, las diferentes etapas microbiológicas de la degradación anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). En caso que la materia orgánica contenga una gran cantidad de acidez o alcalinidad, la producción de biogas podrá verse inhibida. Como referencia, un buen rendimiento en la producción de metano dentro del biogas, estará en un rango de pH entre 6,5 y 7,5 (SEMARNAT *et al.*, 2010).

El efluente líquido del BTLC, que es un abono orgánico llamado biol, será conducido por tubería de rebose hacia una laguna de similares dimensiones que la laguna del BTLC, también impermeabilizada con el mismo tipo de material polimérico. El biol estará disponible para su empleo en fertirriego de pastos o de otros cultivos. Esta laguna trabaja a volumen variable.

La temperatura es el factor clave en la operación de un BTLC. En climas cálidos se requiere lagunas pequeñas y tienen menos variación estacional en la producción de

biogas. Temperaturas bajas reducen la producción de biogas; sin embargo, se puede compensar con un mayor tiempo de retención hidráulica (TRH), es decir, mayor tiempo de permanencia de la mezcla estiércol-agua en el interior del biodigestor, lo cual permitirá obtener bioabonos de mayor poder fertilizante.

2.2. Componentes del biodigestor tipo laguna cubierta

Separador de sólidos. Es una trampa de sólidos por gravedad ubicada entre la fuente de estiércol y el BTLC. Será de concreto armado. Por el sistema de manejo de excretas y estiércoles y la cantidad de material sólido (contenido de fibras y tamaño de los residuos) que puedan encontrarse en el influente, se consideró la instalación de un separador de sólidos antes de ingresar al biodigestor, para evitar taponamientos en las tuberías, degradación lenta, mayor tiempo de retención, y por ende, mayor tamaño de biodigestor (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Laguna cubierta. En la que el estiércol se deposita mezclado con agua. Ahí permanece el tiempo necesario (TRH) para ser digerido por las bacterias que generan el biogas. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo e impermeabilizada con geomembrana de PVC. Su cubierta será del mismo material y tendrá forma de una cúpula. Los sólidos se asientan en el fondo de la laguna y los líquidos sobrenadan hasta que son transferidos a la laguna secundaria. El biogas producido por digestión bacteriana de la materia orgánica, quedará atrapado entre el nivel de líquido en la laguna y la cubierta de ésta, la inflará y estará disponible para su uso como combustible. El biodigestor estará protegido por un techo para evitar el impacto de la radiación solar y del agua de lluvia.

Laguna para biol. Es una laguna abierta para captar el líquido (biol) que resulta del proceso de generación de biogas. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo e impermeabilizada con geomembrana de PVC. El biol puede emplearse como fertilizante en la agricultura dado su alto nivel de nutrientes, o reutilizarse en el procesamiento de más estiércol. La laguna secundaria tendrá una capacidad igual al volumen de efluente del biodigestor de 10 días, con la finalidad de tener un volumen de biol suficiente para aplicar a las parcelas de pasto para incrementar su producción. Esta laguna tendrá un techo para evitar que el agua de lluvia la inunde.

Cámara de secado de lodos de fondo. Aquí se depositarán los lodos de fondo del digestor extraídos cada seis meses, como purgas de mantenimiento para la buena operación en continuo del sistema de producción de biogas. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo, con paredes estabilizadas con piedra tipo canto rodado y cemento. Los lodos húmedos o secos se podrán extraer con un cargador frontal pequeño para aplicarlos al campo como abono orgánico. Esta cámara será techada para evitar que el agua de lluvia la inunde.

Sistema de purificación y control de biogas. En la tubería de conducción de biogas, se instalarán dos filtros rellenos con clavos de fierro de 2" para eliminar el H₂S, un manómetro en U con agua en sus ramas para medir la presión del sistema en cualquier instante y una válvula de seguridad para operar el sistema a una presión máxima de 15 cm de agua.

Tabla 2. Dimensiones de biodigestores de membrana de caucho AQFLEX.

Volumen (m³)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Angulo talud (°)
25	3,6	3,6	2,50	75
50	5	3	2,50	75
75	7,5	4,5	3,00	75
100	9	5	3,50	75
150	12	5	3,50	75
200	14	9	3,50	45
300	20	9	3,50	45
400	24	9	3,50	45
500	29	9	3,50	45

2.3. Variables de diseño de la laguna cubierta

Tipo de suelo. La laguna se localizará en suelos de baja a moderada permeabilidad, o en suelos que se puedan sellar por acción biológica o de los sedimentos. Evitar suelos

arenosos o de gravilla, suelos superficiales o de roca fracturada. Sin embargo, todo esto se supera impermeabilizando la laguna con manta de material polimérico. El suelo del sitio donde se instalará el BTLC es de tipo arcillas expansivas.

Talud. Se conformarán con pendientes que proporcionen estabilidad duradera acorde al estudio de mecánica de suelos. Se recomienda, conformar el talud de las paredes del biodigestor en una relación de 1:3 y no mayor de 1:1. (Si los taludes aumentan más de 1:1, las paredes se volverán inestables. y menor de 1:3 se requerirá más espacio). Se empleará un talud de 45° debido a que el suelo es de tipo arcillas expansivas. Las superficies de los taludes deberán tener una compactación del 90% Proctor para garantizar que no exista ningún tipo de protuberancias, evitando con ello daños durante la colocación de la geomembrana (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Tabla 3. Inclinación para taludes en diferentes tipos de suelo (EPA, 2001).

Naturaleza del suelo	Angulo del talud (grados)	Densidad (g/m³)
Arena fina seca	10 a 20	1,4
Arena fina húmeda	15 a 25	1,6
Tierra vegetal húmeda	30 a 45	1,6 a 1,7
Tierra compactada	40 a 50	1,6 a 1,8
Arcilla seca	30 a 50	1,6
Arcilla húmeda	0 a 20	1,2 a 1,8
Terreno rocoso	50 a 90	2 a 2,5

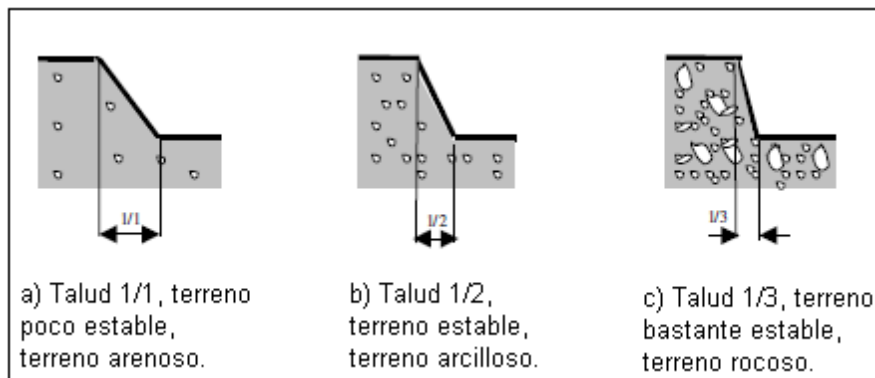


Figura 3. Inclinaciones recomendadas de taludes, en función de los tipos más comunes de suelo (L’Institut de L’Elevage, 1996).

Corona del biodigestor. La corona del biodigestor deberá tener una compactación del 85% al 90% proctor. El ancho de la corona, será de un mínimo de 3 m (libre de tuberías, registros, salida de gas, etc.). Una vez construido el sistema, no se deberá realizar maniobras con maquinaria pesada sobre la corona del biodigestor. A una distancia de un metro desde el borde de la laguna y por todo el perímetro del biodigestor, se debe excavar una zanja de 0,25 m de profundidad x 0,15 m de ancho, para la viga de anclaje de la geomembrana de la cámara y de la cúpula (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Profundidad. Es importante para una adecuada operación. Una laguna profunda ayuda a mantener la temperatura que promueve el desarrollo bacteriano. Profundidades mayores permiten áreas superficiales menores, en consecuencia menor problema por lluvias y menor tamaño y costo de la cobertura. La profundidad mínima de líquido en la laguna cubierta debe ser de 3,0 m (CNA, 2007).

Tiempo de retención hidráulica y dimensionamiento de la laguna cubierta. La laguna anaeróbica se dimensiona en función a un TRH mínimo que se basa principalmente en el clima, se emplea para dimensionar la laguna de manera que las bacterias tengan el tiempo adecuado en ella para descomponer el estiércol.

Tiempo de retención hidráulica mínimo. Debido a que se emplea grandes volúmenes de agua en la limpieza de los establos, puede circular la mezcla estiércol-agua a través de la laguna cubierta tan rápido que las bacterias no pueden descomponer todo el estiércol.

Para evitar este lavado se debe emplear un TRH mínimo para dimensionar la laguna. En base a trabajos previos de instalación y operación de biodigestores (Barrena *et al.*, 2013), en diversos lugares con diferente temperatura ambiente, se concluyó que la producción de biogas está en función a la temperatura ambiente que se relacionan con la ecuación logarítmica: $TRH = -44,705 \ln(T) + 160,394$; que modela el tiempo de retención hidráulico (TRH: días) para la producción de biogas en función de la temperatura (T: °C) ambiente, con un ajuste $R^2 = 0,924$.

Volumen del biodigestor. El volumen del biodigestor debe ser igual al volumen del material a degradar, multiplicado por el tiempo de digestión necesario (TRH) y un volumen adicional para el almacenamiento de biogas (Barrena *et al.*, 2013, SEMARNAT *et al.*, 2010).

Material de la cobertura. Servirá para almacenar el biogas producido. Muchos tipos de materiales se han utilizado para cubrir lagunas en agricultura e industria. Este material debe ser resistente a la radiación ultravioleta, hidrofóbico, resistente al desgarro y pinchaduras, no tóxico a las bacterias, densidad cercana a la del agua. Disponibilidad del material, servicio post venta y costo deben considerarse al escoger el material de cobertura. La geomembrana, que se considere utilizar para la implementación de los proyectos, deberá cumplir como mínimo con las propiedades mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mínimas de la geomembrana (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Propiedad	Unidad	Valor Nominal
Densidad	Kg/m ³	940
Resistencia al Desgarre	N	210
Resistencia al Límite Elástico	N/mm	25
Estiramiento al Límite Elástico	%	13
Resistencia a la Rotura	N/mm	43
Estiramiento a la Rotura	%	700

El espesor de la geomembrana que cubrirá la base del biodigestor deberá ser de al menos 1,0 mm y debe ser igual al de la cubierta, para evitar roturas en el material más débil, en caso de incrementos de presión por acumulación de biogas. La vida útil de la geomembrana deberá ser de más de 20 años, y se deberá garantizar al menos 10 años. La instalación debe ser realizada por técnicos calificados (como mínimo el responsable del grupo de instaladores), con experiencia certificada en este tipo de trabajos.

Cerco perimétrico. Una vez terminada la construcción de todos los componentes del sistema de producción de biogas, se debe instalar un cerco perimétrico de alambre de púas, para evitar que personal no autorizado o animales accedan a esta área. En el cerco perimétrico se colocarán letreros de aviso de restricción de acceso, asimismo en la puerta de entrada.

III. RESULTADOS

3.1. Diseño del sistema de producción de biogas y bioabonos

El sistema de producción de biogas y bioabonos empleando un biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC), tiene los siguientes componentes:

- Sedimentador
- Biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)
- Laguna para almacenar biol
- Poza para secado de lodos de fondo

Primero se diseñó el biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC), debido a que de sus dimensiones dependen las dimensiones de los demás componentes del sistema de producción de biogas y bioabonos.

3.1.1. Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

El diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) se realizó en tres partes:

- Diseño de la cámara del BTLC
- Diseño de la cúpula del BTLC
- Area de geomembrana para el BTLC

3.1.1.1. Diseño de la cámara del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

Para el dimensionamiento del biodigestor se consideró **40 vacas** lecheras de la raza Jersey de pedigree, que es la cantidad máxima que se tendrá en el Establo de la UNTRM, de un peso promedio de 550 kg, cada una de ellas evacua aproximadamente 15 kg de estiércol por día.

$$40 \text{ vacas} \times \frac{15 \text{ kg estiércol}}{\text{vaca} \times \text{día}} = 600 \text{ kg estiércol/día}$$

Para el caso de los BTLC se podrá considerar hasta una relación mínima agua sólidos de 3:1 y máxima de 9:1 (SEMARNAT *et al.*, 2010). En base a las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio y en la instalación, operación y evaluación de biodigestores tubulares de 12

m³ en la Región Amazonas, alimentados con mezcla estiércol:agua, la proporción más adecuada de esta mezcla es 1:5, para tener mayor fluidez en el interior del biodigestor (Chauca, 2010; Julca, 2012; Hellenthal, 2013 y Barrena *et al.*, 2013).

Para el diseño, en el presente trabajo de investigación, se empleó la proporción de **mezcla estiércol:agua de 1:5**, lo que hace 6 partes en total.

$$\frac{600 \text{ kg estiércol}}{\text{día}} \times \frac{6 \text{ L mezcla estiércol: agua}}{\text{kg estiércol}}$$

$$= 3600 \text{ L de mezcla estiércol:agua/día}$$

Entonces, se tuvo disponible **3,6 m³ de mezcla estiércol:agua/día**

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo que permanece la materia orgánica dentro del biodigestor para alcanzar la degradación, está directamente relacionado con la temperatura ambiente promedio y en condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el TRH debería ser de 20 días (Olaya y González, 2009). Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor (Varnero, 2011). Para Chachapoyas, Amazonas, el **TRH es de 35 días** (Barrena *et al.*, 2013); valor que se empleó para el presente diseño.

$$\frac{3600 \text{ L mezcla estiércol: agua}}{\text{día}} \times 35 \text{ días}$$

$$= 126000 \text{ L mezcla estiércol:agua} = 126 \text{ m}^3$$

Entonces, la cámara de fermentación del BTLC debe tener un **volumen útil o de trabajo (Vt) de 126 m³** que representará el 80% del volumen de la cámara (Vc), porque se debe dejar libre el 20% del volumen del biodigestor para la espuma que se forme (Junker, 2003; SAGARPA, 2013) y para que se acumule el biogas producido, de acuerdo a la experiencia de operación de biodigestores tubulares (Aguilar y Botero, 2006; Barrena *et al.*, 2013).

$$V_t = 0,8V_c$$

$$126 = 0,8V_c$$

$$V_c = 157,5 \text{ m}^3$$

Para el dimensionamiento, el volumen de la cámara (V_c) del BTLC se redondeó a 160 m^3 . Según Botero y Preston (1987) y en base a la experiencia en la operación de biodigestores (Barrena *et al.*, 2013), el volumen de biogas que se producirá por día será igual al 35% del volumen de mezcla estiércol:agua contenida en el BTLC, que es el volumen de trabajo (V_t).

$$V_{\text{biogas}} = 0,35V_t \quad V_{\text{biogas}} = 0,35 (126) \quad \mathbf{V_{\text{biogas}} = 44,1 \text{ m}^3 \text{ de biogas/día}}$$

Para conservar el calor en el BTLC, su **profundidad será de 3,0 m** (CNA, 2007). Se consideró que la cámara del biodigestor tenga la forma de un tronco de pirámide invertida, cuya fórmula para calcular su volumen (V_c) es:

$$V_c = \frac{h}{3}(AB + Ab + \sqrt{AB \cdot Ab}) \text{-----} (1)$$

Donde:

AB: área de la base mayor (m^2)

Ab: área de la base menor (m^2)

h: profundidad de la cámara (m)

Según la EPA (2001), $AB = 2Ab$

$$157,5 = \frac{3}{3} (2Ab + Ab + \sqrt{2Ab \cdot Ab})$$

$$157,5 = 3Ab + 1,414Ab \quad ; \quad Ab = 35,68 \text{ m}^2$$

$$L = 5A \quad , \quad l = 5a$$

$$Ab = l \times a = 5a \times a = 5 a^2 = 35,68 \text{ m}^2 ; \quad a = 2,67 \text{ m} \quad ; \quad l = 13,35 \text{ m}$$

$$AB = 2(35,68) = 71,36 \text{ m}^2 \quad AB = L \times A = 5A \times A = 5A^2 = 71,36 \text{ m}^2$$

$$A = 3,78 \text{ m} \quad ; \quad L = 18,9 \text{ m}$$

El terreno disponible para instalar el biodigestor es de arcillas expansivas por lo que es recomendable emplear un **talud de 45°** con respecto al nivel del suelo (SEMARNAT *et al.*, 2010). Se mantuvo constante el ancho de la cámara del biodigestor tanto en la base menor como en la base mayor y se realizó reajustes en el largo de dicha cámara, para llegar al volumen de 160 m³.

Recalculando el volumen de la cámara: $V_c = \frac{3}{3}((12 \times 9) + (6 \times 3) + \sqrt{108 \times 18})$

$$V_c = 170 \text{ m}^3$$

Entonces, las **dimensiones de la cámara del biodigestor** son las siguientes (Figura 4):

Base superior: **largo = 12 m; ancho = 9 m**

Base inferior: **largo = 6 m; ancho = 3 m**

Profundidad = 3 m

Talud = 45°

Volumen = 170 m³

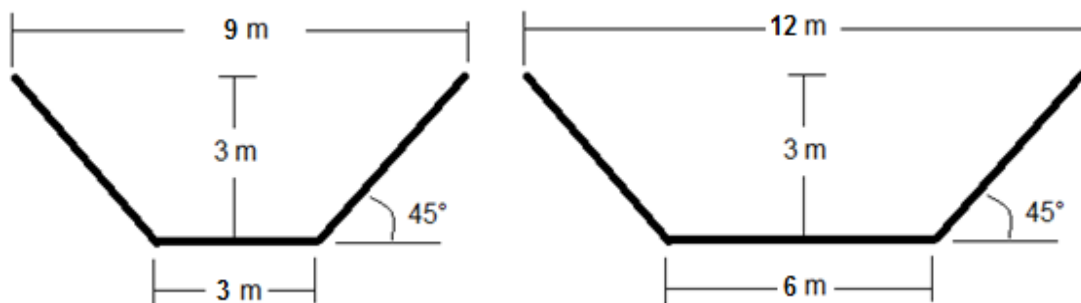


Figura 4. Dimensiones de la cámara del biodigestor.

El biodigestor tiene una **corona de 3 m de ancho**, con una compactación del 85 al 90% Proctor. A 0,5 m del borde de la cámara del biodigestor se excavará una **zanja de 0,25 m**

de profundidad x 0,15 m de ancho, en todo su perímetro para la viga de anclaje de la geomembrana de la cámara y de la cúpula, sobre la corona (Figura 5).

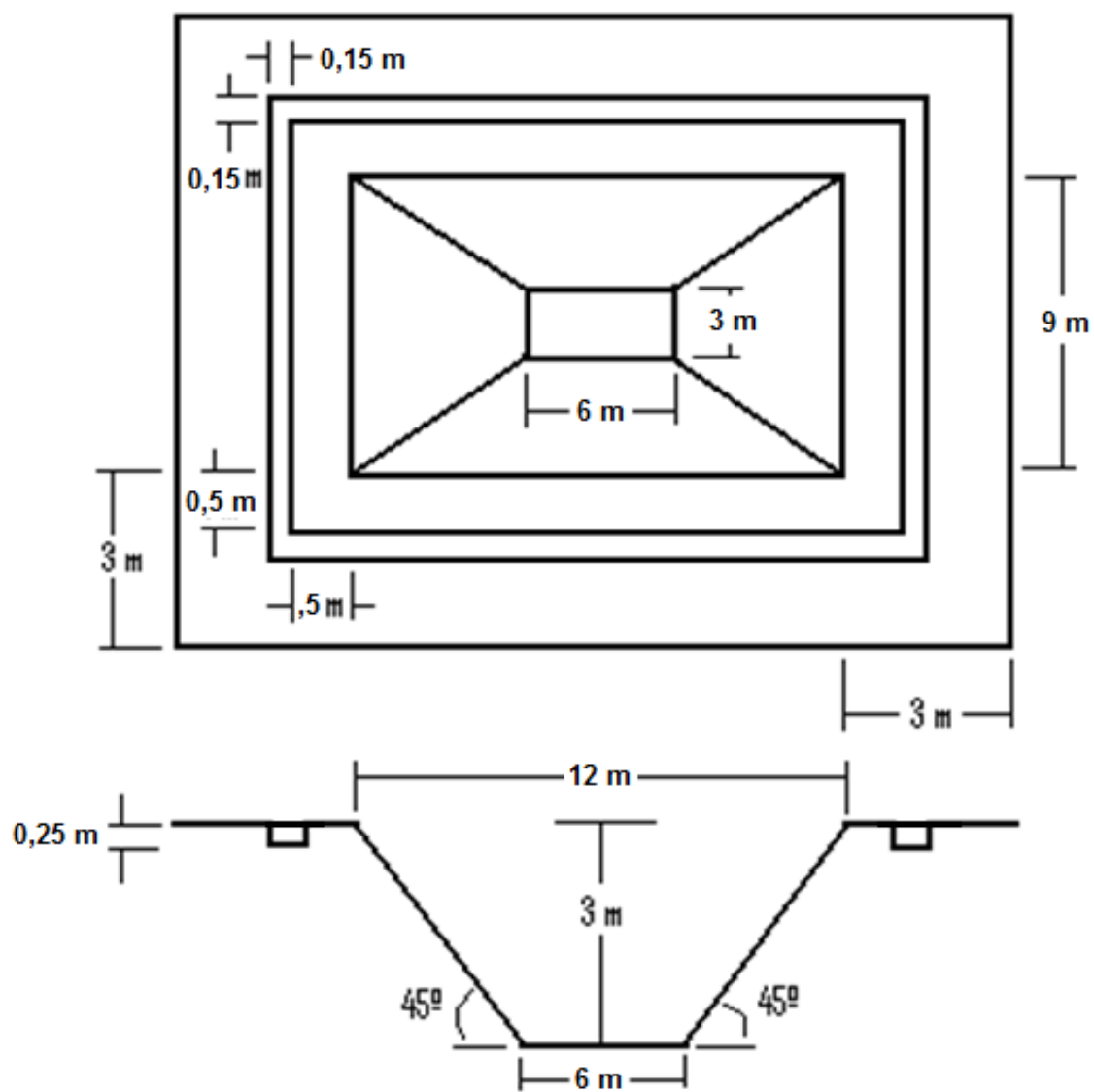


Figura 5. Vista superior y lateral de la cámara del biodigestor.

3.1.1.2. Diseño de la cúpula del BTLC

La cúpula del biodigestor servirá para almacenar el biogas producido. La cúpula se inflará hasta 1,8 m en su parte central. Para el cálculo de sus dimensiones se tuvo en cuenta la Figura 6, donde:

Lado del polígono inscrito (XY): $lp = 9 \text{ m}$

Sagita (WT): $S = 1,8 \text{ m}$

Radio: $r = (lp^2 + 4S^2)/8S$

$$r = (9^2 + 4(1,8)^2)/8(1,8) \quad \mathbf{r = 6,53 \text{ m}}$$

$$\text{sen } \alpha = (lp/2)/r \quad \text{sen } \alpha = 4,5/6,53 \quad \alpha = \arcsen(4,5/6,53) \quad \alpha = 43,56^\circ$$

$$\theta = 2 \alpha \quad \theta = 87,12^\circ$$

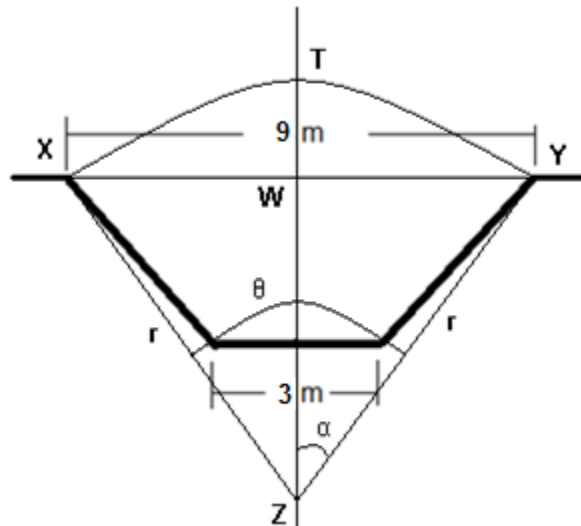


Figura 6. Cúpula del biodigestor.

Longitud del arco de la cúpula (la)

Es la trayectoria XTY en la Figura 6. Se calcula con la fórmula: $la = \theta.r.\pi/180$

$$la = 87,12^\circ \times 6,53 \text{ m} \times \pi/180^\circ \quad \mathbf{la = 9,93 \text{ m}}$$

Apotema (ap) de la cúpula

Es el segmento WZ en la Figura 6. Se calcula con la fórmula: $ap = \sqrt{r^2 - \left(\frac{lp}{2}\right)^2}$ -----

(2)

$$ap = \sqrt{(6,53)^2 - (4,5)^2} \quad \mathbf{ap = 4,73 \text{ m}}$$

Area del segmento circular (Aseg)

Aseg = Area del sector circular (XTYZ) – Area del triángulo XYZ

$$Aseg = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \theta \cdot r^2\right) - \left(\frac{lp \cdot ap}{2}\right)----- (3)$$

$$Aseg = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (87,12^\circ) \cdot (6,53)^2\right) - \left(\frac{9 \times 4,73}{2}\right)$$

$$\mathbf{Aseg = 11,13 \text{ m}^2}$$

Volumen de la cúpula del biodigestor (Vcb)

$$Vcb = Aseg \times \text{largo del biodigestor}----- (4)$$

$$Vcb = 11,13 \text{ m}^2 \times 12 \text{ m} ; \quad \mathbf{Vcb = 133,56 \text{ m}^3}$$

Capacidad de almacenamiento de biogas

$$\text{Volumen libre en la cámara del biodigestor} = 170 \text{ m}^3 - 126 \text{ m}^3 = 44 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen disponible para almacenar biogas en la cámara y en la cúpula del biodigestor} = 44 \text{ m}^3 + 133,56 \text{ m}^3 = 177,56 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de biogas producido por día} = 44,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Capacidad de almacenamiento de biogas} = 177,56 \text{ m}^3 / (44,1 \text{ m}^3/\text{día}) = \mathbf{4,03 \text{ días}}$$

En el caso que la mezcla estiércol:agua ocupe todo el volumen de la cámara del biodigestor ($V = Vt$), se producirán 59,5 m³ de biogas/día. Sólo quedará disponible el volumen de la cúpula para almacenar el biogas, lo que corresponderá a la producción de biogas de 2,24 días.

3.1.1.3. Area de geomembrana para el BTLC

Se calculó el área de geomembrana necesaria para la cámara del biodigestor, vereda, anclaje y cúpula, de la manera que se muestra a continuación.

Area lateral de la cámara del biodigestor: AL

$$AL = ap\left(\frac{PB+Pb}{2}\right) + Ab \text{-----} (5)$$

ap: apotema de la cámara del biodigestor

De la Figura 4: $ap = \sqrt{3^2 + ((12 - 6)/2)^2}$ ap = 4,24 m

PB: perímetro de la base mayor

Pb: perímetro de la base menor

Ab: área de la base menor

$$AL = 4,24 \left(\frac{42 + 18}{2} \right) + (6 \times 3)$$

$$AL = 145,2 \text{ m}^2$$

Area de la vereda: AV

$$AV = 2(0,5 \times 13) + 2(9 \times 0,5); \quad AV = 22 \text{ m}^2$$

Area sobre la viga de anclaje: AA

$$AA = 2(0,20 \times 13,4) + 2(0,2 \times 10,00); \quad AA = 9,36 \text{ m}^2$$

Area de la cúpula: ACU

$$ACU = (la \times L) + Aseg + AV + AA$$

$$ACU = (9,93 \times 12) + 11,13 + 22 + 9,36; \quad ACU = 161,65 \text{ m}^2$$

Area de geomembrana: Ageo

$$\text{Ageo} = \text{AL} + \text{AV} + \text{AA} + \text{ACU}$$

$$\text{Ageo} = 145,2 + 22 + 9,36 + 161,65 \qquad \text{Ageo} = 338,21 \text{ m}^2$$

En consecuencia, se requieren 338,21 m² de geomembrana para recubrir la cámara del biodigestor y cubrir toda su superficie (cúpula) para tener un ambiente anaeróbico.

3.1.2. Diseño de la laguna para almacenar biol

En esta laguna se almacenará el efluente líquido del biodigestor (biol), producido durante diez días de operación, que representará el 80% del volumen total de esta laguna (VL). El efluente diario será igual al volumen de alimentación diaria del biodigestor (3,6 m³ de mezcla estiércol:agua).

$$\text{VL} = (10 \text{ días} \times 3,6 \text{ m}^3/\text{día})/0,80$$

$$\text{VL} = 45 \text{ m}^3$$

La laguna tendrá forma de tronco de pirámide invertida con una profundidad de 1,5 m (CNA, 2007) y un talud de 45°.

$$\text{VL} = \frac{h}{3} (\text{YZ} + \text{WT} + \sqrt{\text{YZ} \times \text{WT}}) \text{----- (6)}$$

YZ: área de la base mayor

WT: área de la base menor

h: profundidad

(EPA, 2001): YZ = 2WT ; h = 1,5 m

$$\text{VL} = \frac{1,5}{3} (2\text{WT} + \text{WT} + \sqrt{2\text{WT} \times \text{WT}})$$

$$VL = \frac{1,5}{3}(3WT + 1,414WT) = 45$$

$$WT = 45/(0,5 \times 4,414) \quad WT = 20,39 \text{ m}^2: \text{ Area de la base menor}$$

El largo de la base menor (W) será igual a dos veces su ancho (T): $W = 2T$

$$WT = 2T \times T = 2T^2 = 20,39 \quad T = \sqrt{20,39/2}$$

$$\text{Ancho de la base menor: } T = 3,19 \text{ m} \quad \text{Largo de la base menor: } W = 6,38 \text{ m}$$

$$YZ = 2(20,39) = 40,78 \text{ m}^2: \text{ área de la base mayor}$$

$$YZ = 2Z \times Z = 2Z^2 = 40,78 \quad Z = \sqrt{40,78/2}$$

$$\text{Ancho de la base mayor: } Z = 4,52 \text{ m} \quad \text{Largo de la base mayor: } Y = 9,04 \text{ m}$$

Haciendo un reajuste en las dimensiones debido al talud de 45° y a la profundidad de 1,5 m, para llegar al volumen de 45 m^3 , se obtienen las dimensiones mostradas en la Figura 7.

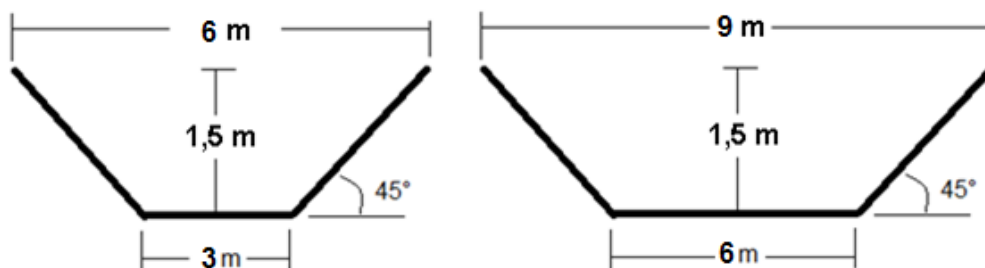


Figura 7. Dimensiones de la laguna de almacenamiento del efluente.

Entonces, las **dimensiones de la laguna** serán (Figura 8):

Base superior: **largo = 9 m; ancho = 6 m**

Base inferior: **largo = 6 m; ancho = 3 m**

Profundidad = 1,5 m

Talud = 45°

Volumen = $51,6 \text{ m}^3$

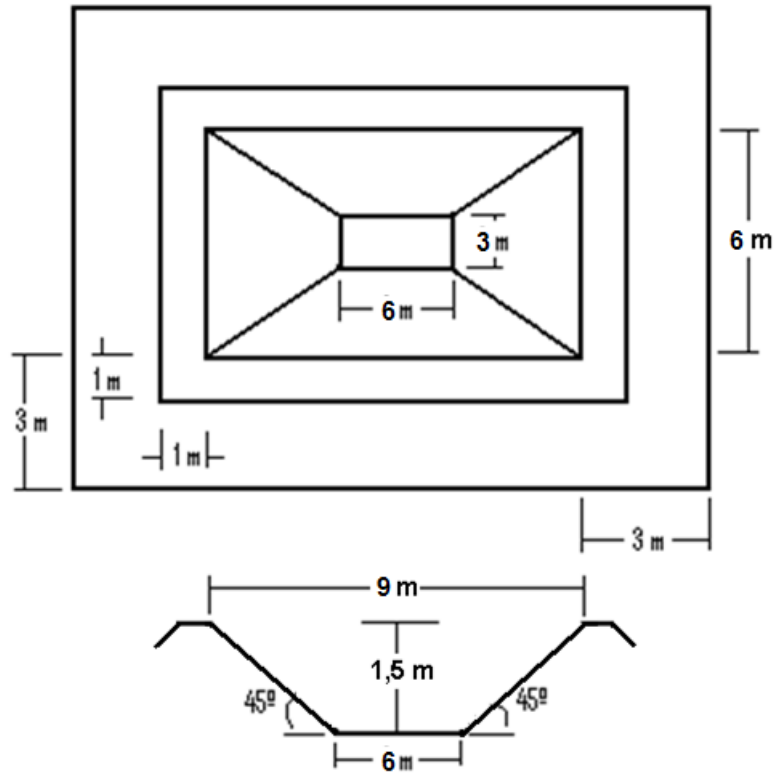


Figura 8. Vista superior y lateral de la laguna de almacenamiento de efluente.

Esta laguna tendrá una corona de 3 m con una compactación del 85 al 90% Proctor; una vereda de 1 m de ancho en todo su perímetro, iniciando en el borde de la laguna, cubierta con la misma geomembrana que impermeabilizará la laguna. A continuación de la vereda irá un metro más de geomembrana en todo el perímetro, la que se enterrará como anclaje.

Area lateral de la laguna: ALL

$$ALL = apL \left(\frac{PBL + Pbl}{2} \right) + AbL \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

apL: apotema de la laguna: $apL = \sqrt{1,5^2 + (9 - 6)/2)^2}$ apL = 2,12 m

PBL: perímetro de la base mayor de la laguna.

PbL: perímetro de la base menor de la laguna.

AbL: Area de la base menor de la laguna.

$$ALL = 2,12 \left(\frac{30+18}{2} \right) + 18 \qquad ALL = 68,9 \text{ m}^2$$

Area de la vereda más anclaje: AVA

Vereda = 1m en todo el perímetro.

Anclaje = 1 m en todo el perímetro.

$$AVA = 2(13 \times 2) + 2(6 \times 2) = 76 \text{ m}^2$$

Area de geomembrana para la laguna: AGL

$$AGL = ALL + AVA = 68,9 + 76; \qquad \mathbf{AGL = 145 \text{ m}^2}$$

Por lo tanto, para la laguna de almacenamiento de biol se requiere 145 m² de geomembrana.

3.1.3. Diseño de la poza para secado de lodos de fondo (biosol)

Esta poza o cámara tiene dimensiones similares a la cámara del biodigestor, pero de 2 m de profundidad, con una rampa para que pueda ingresar un cargador frontal pequeño para retirar los lodos frescos o secos, según se requiera para aplicar al campo como abono orgánico.

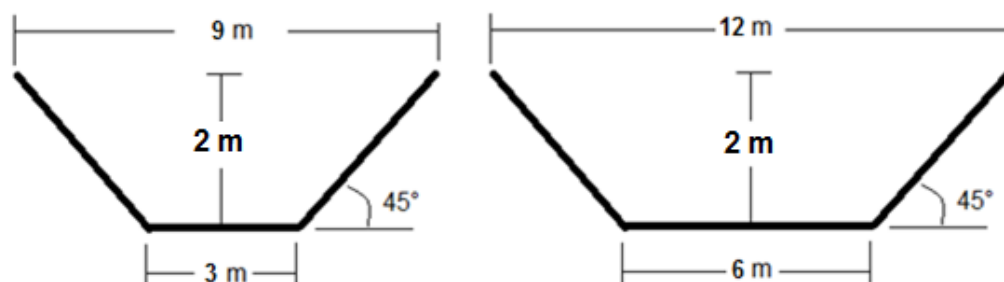


Figura 9. Dimensiones de la poza para secado de lodos de fondo.

Volumen de la poza para secado de lodos de fondo:

$$V_p = \frac{h}{3} (AB + Ab + \sqrt{AB \cdot Ab}) \text{-----} (8)$$

Donde:

AB: área de la base mayor (m²) = 9 m x 12 m = 108 m²

Ab: área de la base menor (m²) = 3 m x 6 m = 18 m²

h: profundidad de la cámara (m) = 2 m

$$V_p = \frac{2}{3} (108 + 18 + \sqrt{108 \times 18})$$

$$V_p = 113,39 \text{ m}^3$$

A las áreas donde se ubicó cada componente del sistema de producción de biogas y bioabonos se debe colocar techo para protegerlo de la lluvia y la radiación solar directa, con lo que se prolongará su vida útil. El techo evitará que el agua de lluvia diluya inadecuadamente el biol y los lodos de fondo que se desea secar.

3.1.4. Diseño del sedimentador

El sedimentador servirá para retirar los sólidos que vienen con el estiércol, los ligeros por flotación y los inertes (arena, tierra, piedras) por sedimentación. Será de concreto armado, con un área útil de 1,20 m² y un volumen de 1,00 m³; cuyas dimensiones principales serán: 2,00 m de largo, 0,60 m de ancho y 1,00 m de profundidad. Tendrá una cámara de entrada y otra de salida de las mismas dimensiones (0,60 m de largo, 0,60 m de ancho y 1,00 m de profundidad), ambas con registro de 4" en el fondo para retirar los sedimentos a través de tubería de 4" de PVC; entre estas cámaras habrá una tercera cámara con fondo inclinado ascendente hacia la cámara de salida, a 0,40 m del fondo en el lado de la cámara de entrada y 0,60 m del fondo en el lado de la cámara de salida; con mamparas cada 0,40 m para dirigir el flujo de la mezcla estiércol-agua y favorecer la separación de los sólidos flotables y sedimentables. La entrada al decantador estará a 0,10 m del borde superior y equidistante de los lados; la salida estará en la parte central de la cara de salida de la cámara. Los detalles y dimensiones del sedimentador se muestran en la Figura 10 y 11.

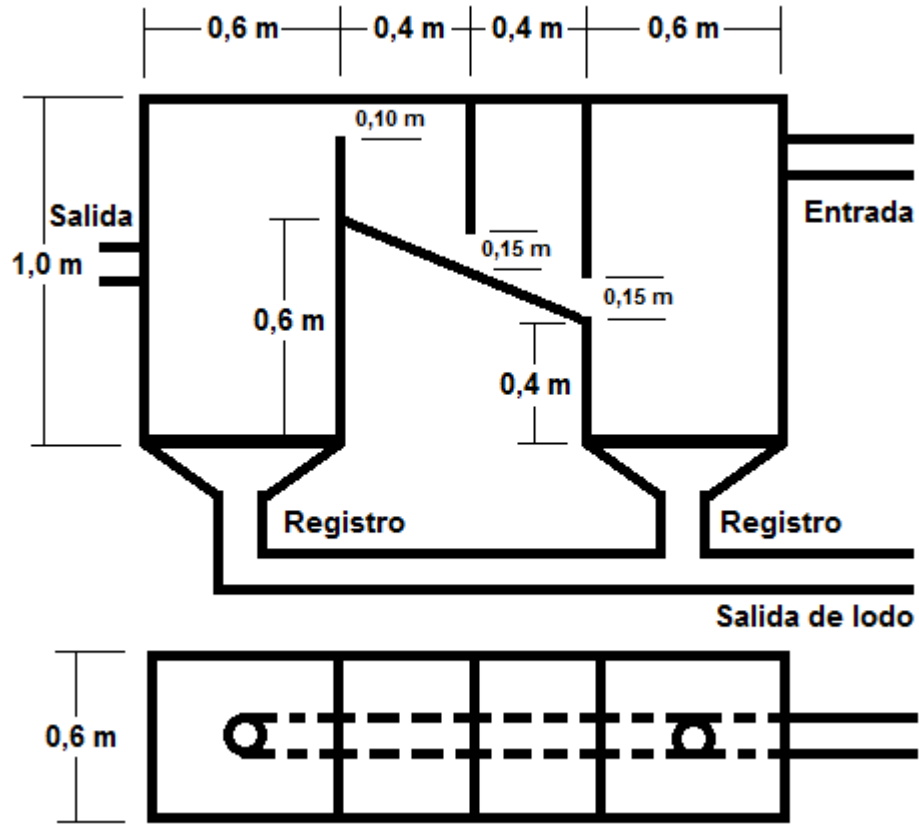


Figura 10. Dimensiones del sedimentador.

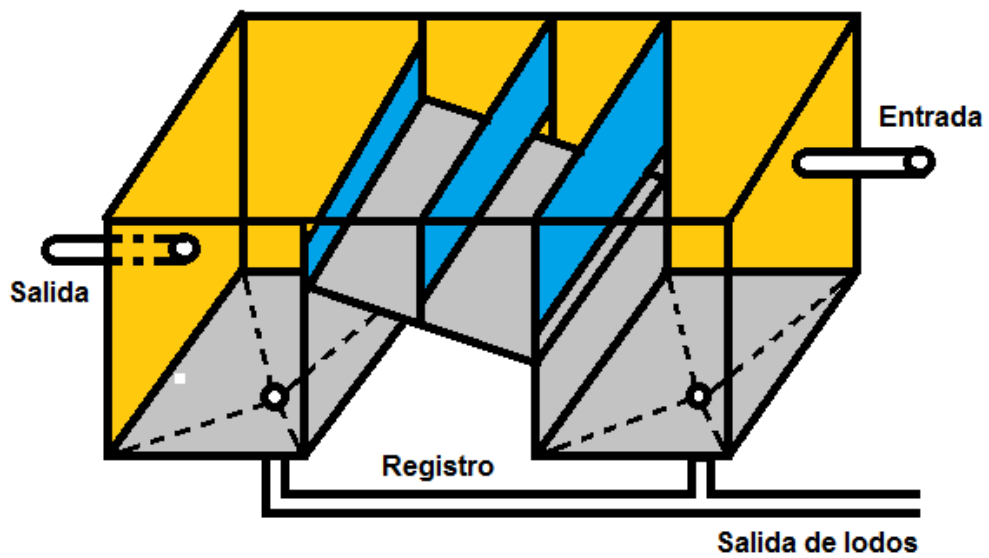


Figura 11. Esquema del sedimentador.

3.2. Construcción e instalación del sistema de producción de biogas y bioabonos

3.2.1. Construcción del sedimentador

Se hizo de concreto armado, con las dimensiones y forma mostrada en las Figuras 10 y 11.

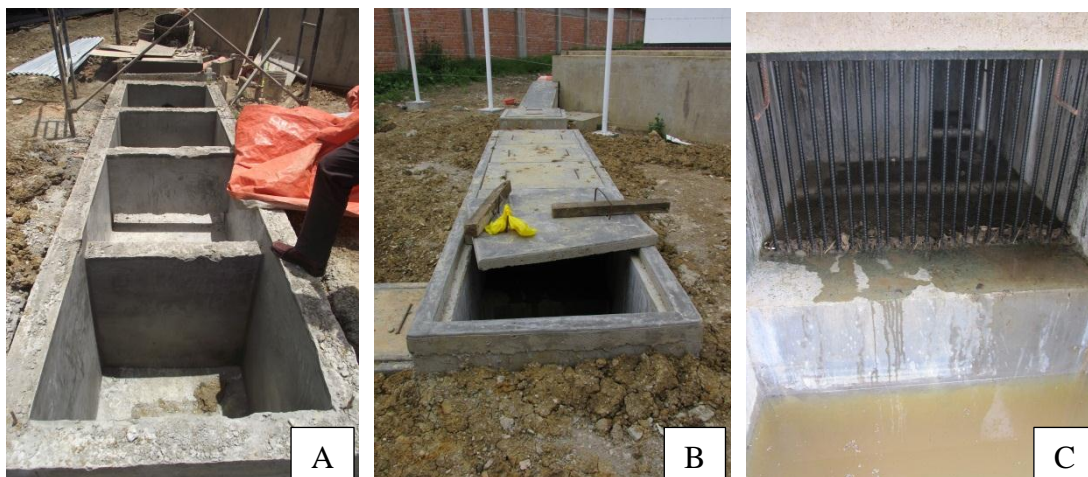


Figura 12. Sedimentador para alimentación del BTLC. A: vista interior. B: tapas protectoras. C: rejilla de la última cámara.

3.2.2. Construcción de la poza e instalación del biodigestor tipo laguna cubierta

Se empleó una retroexcavadora para hacer la cámara del biodigestor y el acabado se hizo manualmente con palana. Debido a que el suelo es arcilloso hubo problemas de derrumbes, por lo que se tuvo que colocar piedra plana tipo canto rodado con concreto en las paredes de la cámara para estabilizarla (Figura 13). Del sedimentador se conectó un tubo de PVC de 8" para conducir la alimentación al biodigestor, a una profundidad de 50 cm del borde. En el lado izquierdo del biodigestor y a 40 cm del borde superior se instaló una tubería de 4" de PVC para que por rebose pase el biol del biodigestor hacia la laguna de almacenamiento de biol. A ras del fondo de la cámara del BTLC se instaló dos tubos de 6" de PVC para conectar el biodigestor con la poza de secado de lodos de fondo, servirán para extraer el biosol o lodo de fondo a manera de purgas para mantener operativo el biodigestor; en esta trayectoria cada uno de los tubos tiene una llave de paso de 4" para regular el flujo.



Figura 13. Construcción de la cámara del BTLC. A: excavación. B: terminado a palana. C: fijado de puntos para ubicar el fondo de la poza. D: verificación la profundidad de la poza. E: derrumbes en paredes por lluvias. F: reforzado de paredes con canto rodado concreto.

Para agitar la mezcla estiércol:agua contenida en el biodigestor, se instaló una electrobomba de 2 hp, con tubería de succión y descarga de PVC de 1", que funciona como un sistema de recirculación de biol dentro del biodigestor.



Figura 14. A: cartel de obra. B: salida de biogas del digester. C: electrobomba de 2 hp para recircular el sustrato en fermentación dentro del digester. D: placa de la electrobomba.

3.2.3. Construcción e instalación de la laguna para almacenar biol

La excavación se hizo con retroexcavadora y acabado manual. Debido a que el suelo es arcilloso hubo problemas de derrumbes, por lo que se tuvo que colocar piedra plana tipo canto rodado con concreto en las paredes de la cámara para estabilizarla (Figura 15).

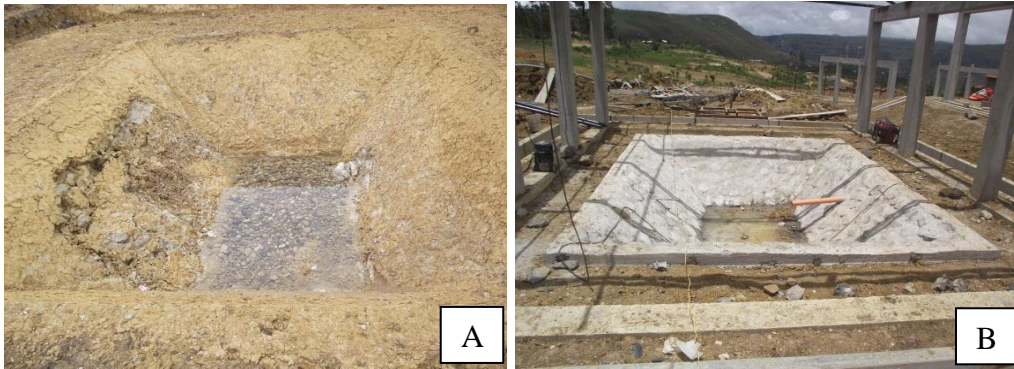


Figura 15. A: Excavación y B: reforzado de la laguna para almacenar biol.

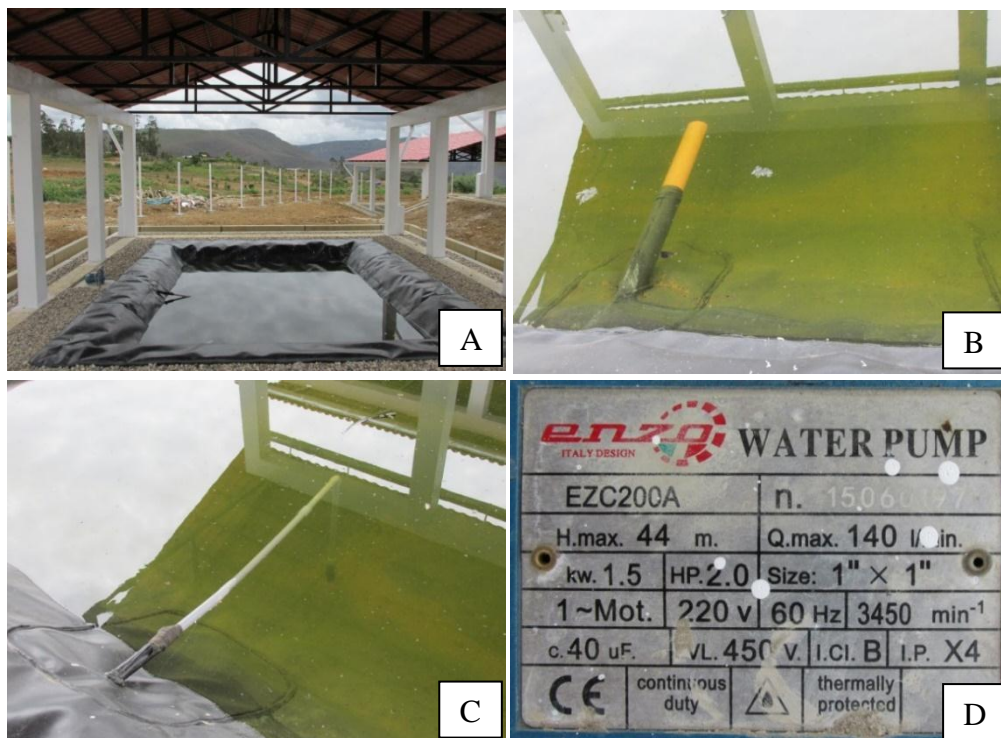


Figura 16. A: laguna terminada para almacenar biol. B: tubería de rebose de biol del digester. C: tubería de succión y D: placa de la bomba de 2 hp para extraer biol.

3.2.4. Cámara para secado de lodos de fondo

La excavación se hizo con retroexcavadora y las paredes se estabilizaron con piedra plana tipo canto rodado y concreto. En uno de sus lados se hizo una rampa para que pueda ingresar un cargador frontal pequeño para retirar el lodo seco. La mitad del piso de la cámara es de piedra como filtro percolador para drenar el agua y favorecer el secado del biosol (Figura 17). En la cara que da al biodigestor salen los dos tubos de PVC de 4” para extraer el biosol.



Figura 17. Cámara para secado de lodos de fondo del digestor. A: reforzado de paredes con canto rodado y concreto. B: rampa de acceso al fondo de la cámara. C: cámara terminada.

El área ocupada por el BTLC, la laguna para almacenar biol y la cámara para secado de lodos de fondo se cubrió con techo a dos aguas soportado en tijerales de fierro, para protegerlos de las lluvias y a la geomembrana de la radiación solar directa para alargar su vida útil.

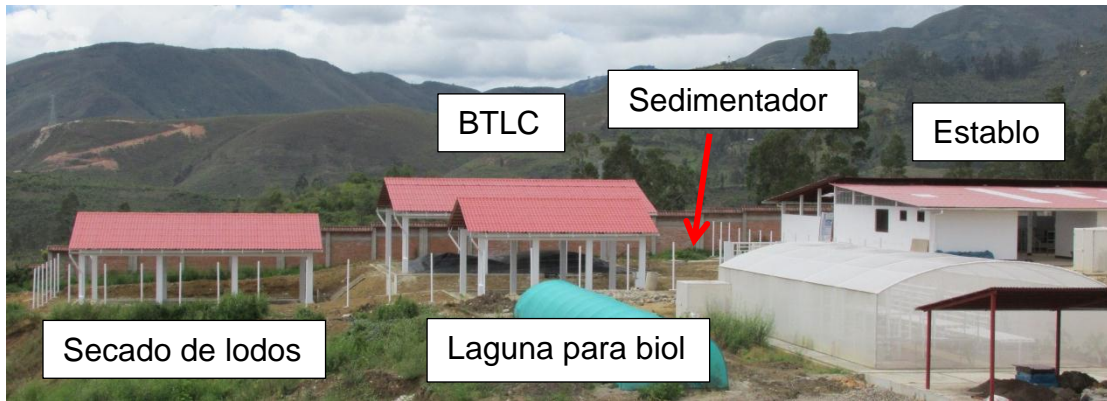


Figura 18. Ubicación de los componentes del sistema de producción de biogas en la UNTRM, Amazonas – Perú.

3.3. Operación del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

3.3.1. Carga del BTLC

El estiércol del ganado vacuno de la raza Jersey que se cría en el establo de la UNTRM es la materia prima para preparar la carga del BTLC. El piso de cemento del establo facilita su lavado con agua a presión, labor que se realizó todos los días generándose una mezcla estiércol:agua que discurre hacia las canaletas de cemento y de éstas al sedimentador del sistema de producción de biogas y bioabonos, donde se separan los sólidos suspendidos pesados por precipitación y los sólidos livianos que flotan, luego la mezcla uniformizada estiércol:agua discurre desde la poza final del sedimentador, por la tubería de 8" de PVC, hacia el interior del BTLC (Figura 19).



Figura 19. A: piso del establo de la UNTRM. B y C: canaleta de conducción de la mezcla estiércol:agua al sedimentador. D: sedimentador y biodigestor.

Se empleó como inóculo de la mezcla estiércol:agua contenida en el BTLC, el rumen de las reses recién sacrificadas en el Camal Municipal de Chachapoyas, que fue transportado en cilindros de polietileno de 80 L (Figura 20) ocupando $\frac{3}{4}$ de su volumen total, debido a que fermenta rápidamente e incrementa su volumen por los gases producidos y tiende a derramarse. La tapa del cilindro se fijó con su seguro perimétrico para evitar que sea expulsada por la presión de los gases. Junto al sedimentador, los cilindros con el rumen se destaparon cuidadosamente para no rociar con el spray de rumen al personal de apoyo, enseguida se vaciaron en la poza final del sedimentador y se le adicionó agua para diluirlo, con agitación para que ingrese al BTLC (Figura 21).



Figura 20. Recolección del rumen en el Camal Municipal de Chachapoyas. A: panza de res con rumen. B: corte de la panza para extraer el rumen. C y D: recolección del rumen.



Figura 21. Inoculación con rumen en el BTLC. A: transporte del rumen. B, C y D: carga del rumen. E: ingreso de la mezcla rumen: agua al biodigestor.

Si la tubería que conduce la alimentación desde el sedimentador hacia el biodigestor se atora, se debe emplear una sonda especial para desatorar tuberías en cuya punta tiene un espiral que ayudar a remover los cuerpos que obstruyen o atoran la tubería. La sonda se introduce en la tubería y se la va empujando y haciendo girar para remover la masa que obstruye la tubería (Figura 22); de ser necesario, se hacen movimientos de entrada y salida de la sonda en la tubería para forzar la circulación de la mezcla alimentada al BTLC.



Figura 22. Desatoro de la tubería de alimentación del BTLC. A: punta de la sonda. B y C: sondeo de la tubería de alimentación. D y E: flujo de la alimentación al biodigestor. F: continuación de la inoculación con rumen. G: biodigestor en su volumen de trabajo.

El recorrido de la mezcla estiércol:agua desde el establo al sedimentador y de allí al BTLC, se representa en la Figura 23. La descomposición anaeróbica del estiércol dentro del BTLC produce biogas que infla la cubierta. El estiércol descompuesto soluble en agua (biol) pasa por rebose a la laguna para almacenar biol. Lo que no se solubiliza se acumula en el fondo del BTLC y se retira cada seis meses como purgas, para lo cual se abren las llaves de paso de las tuberías ubicadas al fondo del BTLC, observándose la salida de un líquido espeso hasta que salga ligero como el biol, en ese momento se cierran las llaves. Estas purgas mantienen operativo al sistema.

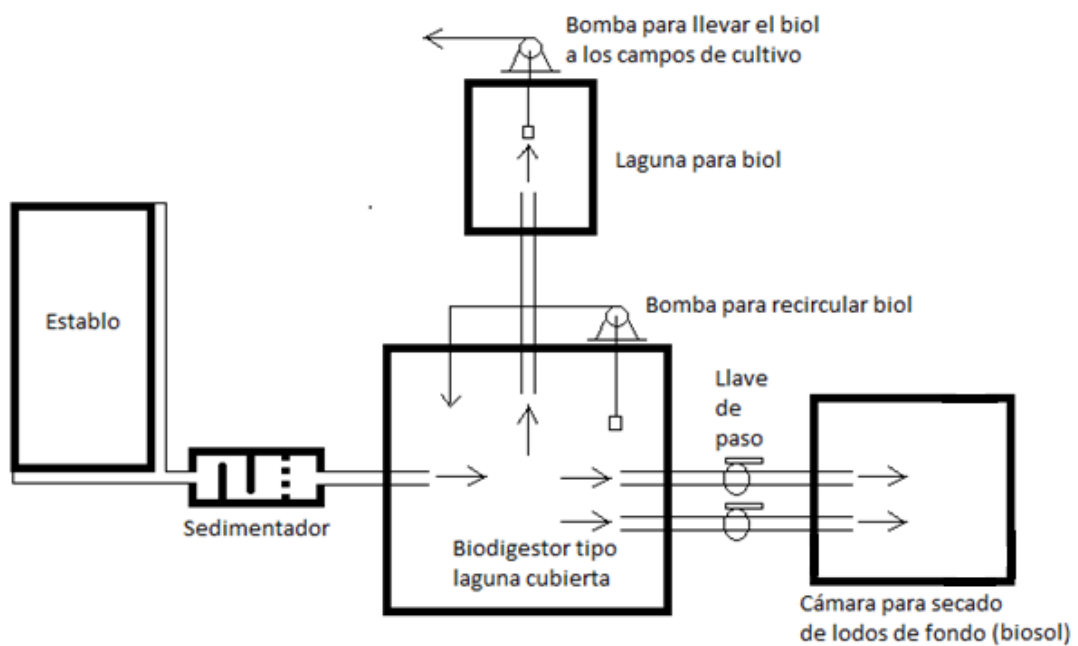


Figura 23. Esquema del sistema de producción de biogas y bioabonos con BTLC.

La conexión de los componentes del sistema de producción de biogas, biol y biosol se muestra en la Figura 24, donde se aprecia que la tubería de alimentación está más abajo que la tubería de drenaje del BTLC hacia la laguna para almacenamiento de biol y ambas están bajo el nivel de la mezcla estiércol:agua contenida en el biodigestor, para evitar la fuga de biogas. La salida de biosol es regulada con las llaves de paso. El BTLC tiene una bomba centrífuga para recircular biol, lo que a su vez agita la mezcla en fermentación.

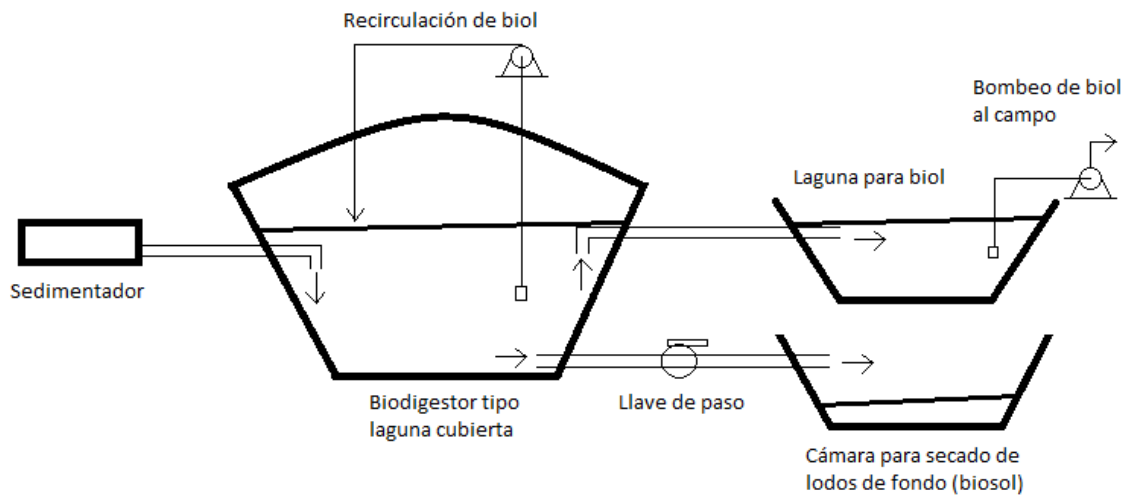


Figura 24. Esquema de desniveles entre los componentes del sistema de producción de biogas y bioabonos con BTLC.

3.3.2. Recirculación y extracción de biol del BTLC

La recirculación del biol dentro del biodigestor se hace con una electrobomba centrífuga de 2 hp, la que debe cebarse con agua antes de encenderla, porque si tiene aire en la tubería de succión no bombeará. Para bombear biol a los campos de cultivo también se emplea una electrobomba centrífuga de 2 hp.

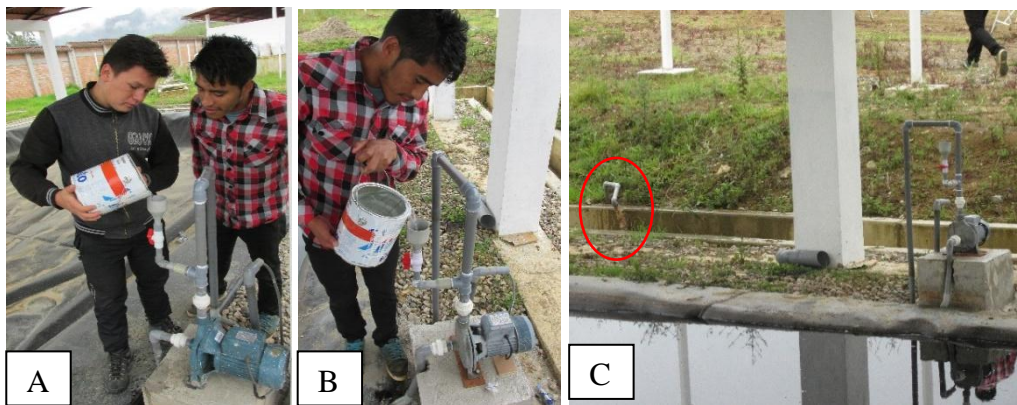


Figura 25. Cebado de electrobombas para recircular biol (A) y para bombear biol (B y C).

Como se presentaron fallas en el sistema de recirculación de biol del BTLC, para revisar la tubería de succión se hizo un corte longitudinal de 2 m de largo aproximadamente, en la geomembrana del borde de la cúpula del BTLC, a un costado de la bomba de recirculación, para que el personal ingrese con la ayuda de una escalera. Se encontró que la tubería de succión de PVC estaba rota en dos tramos, por lo que se procedió a cambiarla por tubería y accesorios de PVC pesado de 1". Además, con tubo de PVC de 4" y un codo de 45° de PVC de 4", se subió el nivel de salida de biol del BTLC hacia la laguna para almacenamiento de biol, como se aprecia en la Figura 26.



Figura 26. Reparación de tuberías. A: corte de la geomembrana para ingresar al biodigestor. B: tubería de succión reparada para recircular biol. C: subida del nivel para salida de biol del BTLC.

3.3.3. Parchado de la geomembrana del BTLC

El corte (o pinchadura) de la geomembrana de polietileno del biodigestor se resanó colocando un parche del mismo material, mediante el siguiente procedimiento (Figura 27):

- a) Se ubicó y demarcó el área afectada (Figura 27A).
- b) Se cortó un parche de geomembrana de polietileno (del mismo tipo de la del biodigestor) que cubría holgadamente la falla a resanar (Figura 27B, C, D, F y G).
- c) Se limpió con trapo húmedo la zona de geomembrana a resanar y el parche a colocar.
- d) Se desgastó, con una amoladora con disco abrasivo, 1 cm del borde de la cara del parche que quedará en contacto con la geomembrana (Figura 27E).

- e) Se soldó el parche a la geomembrana con una serie de puntos cada 5 cm aproximadamente, generados por la fusión de ambos por acción del aire caliente producido por un soplador eléctrico a 600°C (Figura 27H e I).
- f) Se desgastó, con la amoladora con disco abrasivo, 1 cm del borde del parche y 1 cm de la geomembrana (Figura 27J).
- g) Se aplicó, con la máquina que funde la mecha de polietileno a 276°C, un cordón de 2 cm aproximadamente de polietileno fundido, que unió el parche con la geomembrana (Figura 27K, L y M).

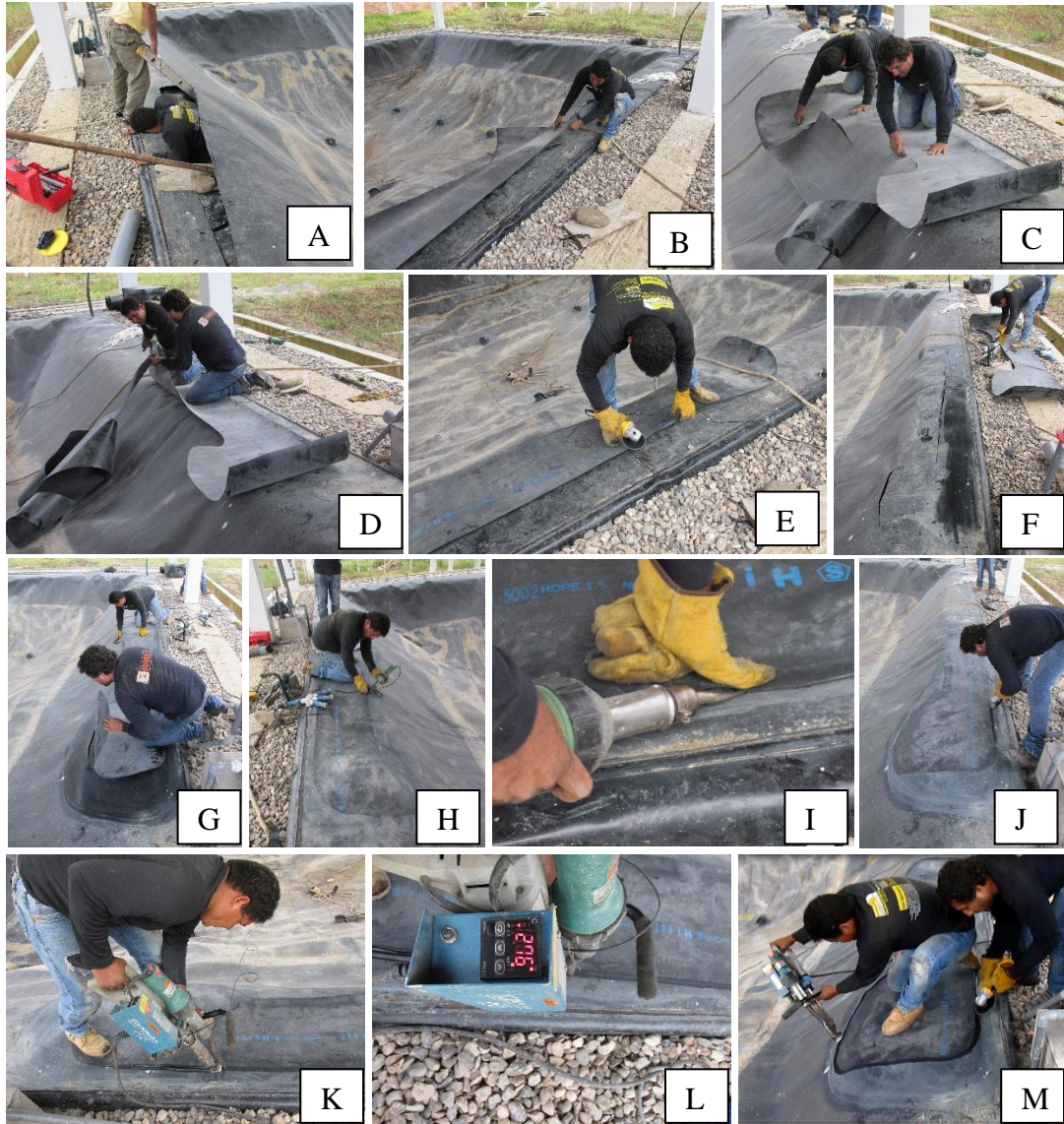


Figura 27. Parchado de la geomembrana del biodigestor.

3.3.4. Extracción de biosol

El BTLC tiene a ras del fondo dos tubos de PVC de 6" con llave de paso en su trayecto para retirar biosol cada seis meses a manera de purga, que permite el funcionamiento continuo del BTLC. Para retirar el biosol se abre una o ambas llaves de paso y se verá discurrir el lodo de fondo hacia la cámara de secado. Al inicio sale el biosol un poco espeso y después sale más fluido, en ese momento se cierran las llaves. Esta operación se repite dos días más y deben transcurrir seis meses para una nueva purga.

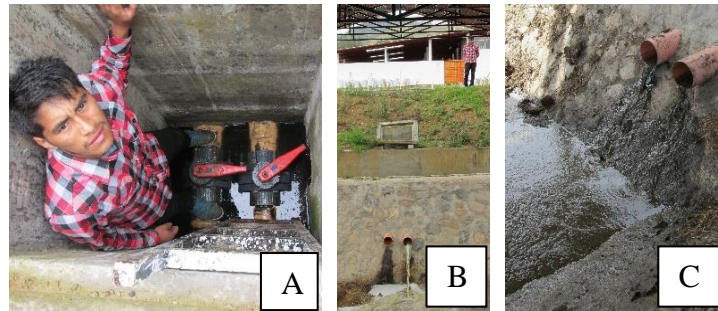


Figura 28. A: llaves para extracción de biosol del BTLC. B y C: salida de biosol.

3.3.5. Mantenimiento del sedimentador

En el fondo del sedimentador quedan retenidas arena y piedras que viene con la mezcla estiércol:agua del Establo, las que retiradas con palana. Asimismo, en la parrilla del sedimentador ubicada en el último tercio de su longitud, quedan retenidos trozos de pasto, los que son retirados con la ayuda de un tridente.



Figura 29. Secuencia de retiro de arena del sedimentador.



Figura 30. Secuencia de paso de la mezcla estiércol:agua por el sedimentador.

3.3.6. Correcciones en la laguna para almacenar biol

Debido a la falla en el desnivel desde la boca del tubo de salida de biol del BTLC hacia la laguna para almacenar biol, el tubo que conduce la mezcla estiércol:agua desde el sedimentador (tubo de alimentación) quedaba sobre el nivel del volumen de trabajo del BTLC y se producían fugas de biogas por este tubo; además, la laguna para almacenar biol se rebalsaba causando aniegos a su alrededor. Para solucionar ambos problemas, en el lado de la laguna para almacenar biol se colocó en la boca del tubo de descarga un codo de PVC de 4" x 90°, orientado hacia arriba, al que se acopló un tubo de PVC de 4" x 1 m. Con esto se incrementó la altura de descarga de biol en la laguna y en consecuencia, también se incrementó el nivel de trabajo en el BTLC, con lo que el tubo de alimentación queda debajo del nivel del volumen de trabajo (Figura 31).

También se hizo una refacción en la tubería de drenaje de la laguna para almacenar biol (Figura 32) y en la tubería de succión de la electrobomba que se emplea para bombear el biol al campo o a envases para transportarlo a otros lugares donde se usará como abono orgánico.



Figura 31. A, B, C, D y E: evacuación de la laguna de biol. F, G, H e I: cambio de tubos para subir el nivel de rebose del biodigestor hacia esta laguna.

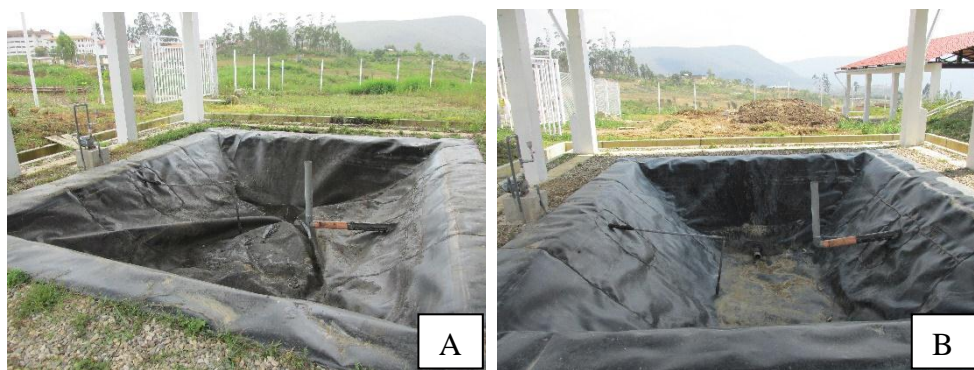
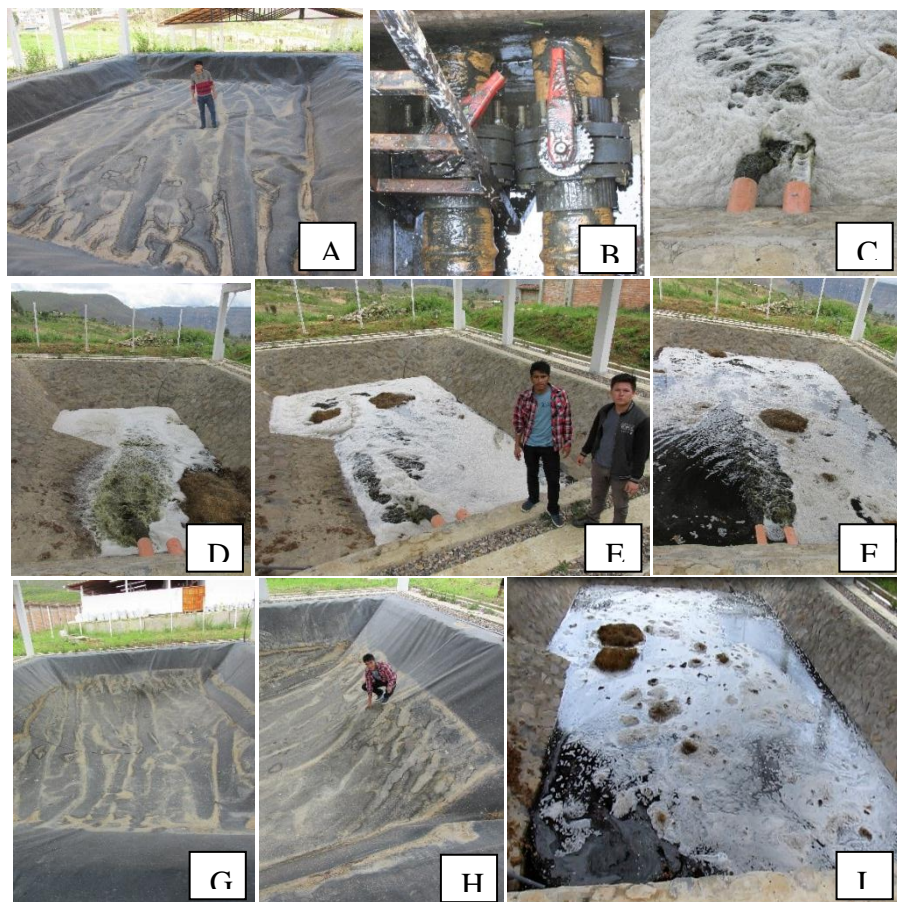


Figura 32. Poza antes (A) y después de ser rehabilitada (B) para almacenamiento de biol.

3.3.7. Evacuación del contenido del BTLC



reparaciones de la geomembrana del biodigestor o de alguno de sus componentes, se lo debe evacuar completamente; para ello, se abren ambas llaves por las que se extrae el biosol, con lo que el contenido del biodigestor pasará hacia la cámara de secado de lodos de fondo, cuya secuencia se muestra en la Figura 33. El contenido del BTLC llena dos veces la cámara para secado de lodos de fondo. Como la mitad del piso de esta cámara es de piedra a manera de filtro percolador, todo el líquido se evacúa y queda un lodo.

Figura 33. Evacuación total del BTLC. A: biodigestor lleno. B: abertura de llaves. C a la I: vaciado total del BTLC.

IV. DISCUSIÓN

Los combustibles fósiles se están agotando, su precio se incrementa y los gases producidos durante su combustión incrementan los gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global. Por ello, es necesario voltear la mirada hacia las fuentes de energías renovables, cuyas tecnologías de aplicación son amigables con el medio ambiente y contribuyen a reducir el consumo de combustibles fósiles.

Unos de los problemas más críticos que enfrenta el mundo es el manejo inadecuado de los residuos producidos en el sector rural, urbano o industrial; que se disponen sin un tratamiento previo, por lo que se convierten en agentes contaminantes de considerable alcance, que afectan los ecosistemas, alteran el equilibrio ecológico y la calidad de vida.

La ganadería es una de las fuentes principales de emisión de gases de efecto invernadero, de manera especial el metano producido en el tracto digestivo de los rumiantes que es liberado al medio ambiente por eructos o ventosidades; además, la descomposición anaeróbica del estiércol almacenado como lodo libera grandes cantidades de metano. Como alternativa para reducir la emisión de metano de la actividad ganadera, se vienen empleando los biodigestores anaeróbicos para procesar el estiércol, captar el metano producido para emplearlo como combustible y el efluente del biodigestor como abono orgánico para reciclaje de nutrientes al suelo, con la finalidad de recuperar o mantener su productividad.

Cuando el ganado se cría estabulado, se dispone de todo el estiércol que producen, con lo que se garantiza la materia prima para producir biogas y bioabonos, cuyo empleo contribuirá a reducir costos de producción, se tendrá una fuente renovable de combustible para cocina o iluminación (Julca, 2012; Hellenthal, 2013; Barrena et al., 2013), para generar energía eléctrica o hacer funcionar una picadora de pasto con motor a biogas en vez de gasolina (Tejedo y Yopán, 2014). Los bioabonos incrementarán la producción de los pastos como lo demostrado por Chauca (2010).

En zonas rurales se cocina con leña y para conseguirla se deforesta. También, debido a la baja productividad de los pastizales, los ganaderos deforestan los bosques para incrementar sus áreas sembradas con pasto para la crianza del ganado. Con el uso de la tecnología del procesamiento anaeróbico del estiércol en biodigestores, las familias del

ámbito rural dispondrán de biogas, un combustible ecológico para la preparación de sus alimentos en reemplazo de la leña lo que disminuirá el impacto ambiental sobre la vegetación natural; además, para calefacción, iluminación o para funcionamiento de motores de combustión interna; y de bioabonos (biol y biosol) que son un residuo estabilizado con excelentes propiedades como abono orgánico, permite incrementar la producción de alimentos, en cantidad y calidad; mejora la fertilidad del suelo, sin contaminarlo, para restituir nutrientes al suelo con lo que se incrementará su productividad. Tanto el biogas como los bioabonos, contribuirán a la sostenibilidad de la actividad agropecuaria y a mejorar la calidad de vida de los usuarios de esta tecnología limpia, amigable con el medio ambiente. La inversión necesaria para implementar un sistema de producción de biogas y bioabonos se justifica plenamente con los beneficios ambientales y sociales que genera.

Las tecnologías socialmente apropiadas, reúnen las siguientes condiciones: son ecológicamente adecuadas, satisfacen necesidades y contribuyen al mejoramiento de las condiciones de vida sin degradar el ambiente; son económicamente viables, su costo de instalación es accesible y se amortiza. Rinde ganancias durante un largo tiempo y son socialmente equitativas. Son aptas para una aplicación descentralizada y sencillas de instalar y mantener, por lo que son útiles en las zonas rurales, alejadas y de difícil acceso (Groppelli y Grampaoli, 2001). En ese sentido, el sistema de producción del biogas y bioabonos es una tecnología socialmente apropiada, porque produce beneficios sociales y ambientales que contribuyen a mejorar la calidad de vida de sus usuarios y reducen el impacto de la ganadería sobre el medio ambiente.

El uso de la biomasa presenta numerosas ventajas para reducir la contaminación ambiental aprovechando la aplicación de biodigestores para transformar esos desechos orgánicos y convertirlos en subproductos (recursos) como el bioabono y el biogas (Longatt, 2007). En ese sentido, se remarca que la descomposición anaeróbica del estiércol en biodigestores son tecnologías sustentables que se pueden emplear en sistemas ganaderos para favorecer el cuidado ambiental y mejorar la economía de este sector productivo. Los productos de la biodigestión contribuyen a mejorar la calidad de vida de la familia usuaria teniendo en cuenta que gracias al biogas producido son dueños de una fuente de energía renovable que facilita la labor de preparación de los alimentos y sobre todo evita la deforestación de las tierras preservándolas para futuras generaciones. El

biofertilizante producido junto con el biogas, económicamente compite con los fertilizantes comerciales y puede ser utilizado en huertas y viveros, ya que tiene un alto poder fertilizante y mejorador de la estructura del suelo.

La secuencia de diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) ha sido adaptada teniendo como base la empleada por Barrena *et al.* (2013), para biodigestores tubulares y por Guardado (2007), para biodigestores de cúpula fija tipo chino.

Según Hidalgo *et al.* (2010), el desarrollo de motores utilizando como combustible al biogas, ha llevado al uso de aplicaciones como el bombeo, riego y transmisión de potencia mecánica. Una motobomba con un motor de 4 tiempos de 389 cm³ refrigerado por aire con una rotación de 3600 rpm, caudal máximo de 30000 L/h, tiene un consumo de 20 m³ de biogas por una hora de trabajo. Un generador eléctrico a biogas o GLP tiene un consumo de biogas de 0,55 a 0,65 m³/kWh y una potencia nominal de 1200 W. Un sistema de calefacción a biogas, puede calentar habitaciones desde 6 hasta 9 m², con una tasa de consumo de biogas de 0,3 m³/h. Además, se usa el biogas para calentar agua y crías de animales domésticos o de granja, debido a su valor calórico de 4700 a 5000 kcal/m³, salvo por su contenido de ácido sulfhídrico (H₂S), se puede considerar como un combustible ideal. Con respecto a lo mencionado, el biogas que se produzca en el biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) que se ha diseñado e instalado en el establo de la UNTRM llegará a un volumen de 44,1 m³/día, y en el sistema se ha incluido y diseñado cartuchos rellenos con clavos de hierro de 2" para eliminar el H₂S del biogas de manera que cuando se emplee el biogas como combustible no cause corrosión en los componentes metálicos de los equipos; además, el volumen de biogas producido será suficiente para hacer funcionar un grupo electrógeno para abastecer con energía eléctrica al establo de la UNTRM con lo que se reducirá su facturación a la empresa proveedora y se contribuirá a la sostenibilidad de su actividad. Asimismo, se empleará el biogas para calefacción de los terneros recién nacidos y para calentar agua para el lavado de las tuberías y accesorios del sistema de ordeño de las vacas.

También mencionan Hidalgo *et al.* (2010), que la aplicación de tipo calórico más común del biogas es para la cocción de alimentos por medio de quemadores (hornillas) y cocinas; por ejemplo, una cocina de dos quemadores a base de biogas tiene una carga calorífica de 2,8 kW, una tasa de consumo de biogas de 0,45 m³/h para cada quemador, una eficiencia del 57% y una presión de entrada del biogas de 1600 Pa. Una olla arrocera a biogas tiene

una carga calorífica de 1,0 kW, una tasa de consumo de biogas de 0,14 m³/h, fuerza de compresión de 1600 Pa y capacidad de cocción de 1,6 kg de arroz. El biogas que se produzca en el BTLC se empleará para cocción de alimentos en cocina de dos hornillas y desinfección de materiales para las actividades de ordeño de las vacas; también se lo empleará como combustible de un soplete para flamear los corrales y asegurar una buena desinfección de los ambientes.

La iluminación también se ha convertido en una opción para aplicaciones del biogas, una lámpara a biogas con encendido electrónico es equivalente a un foco incandescente de 60 a 100 W y tiene un consumo de biogas de 0,07 m³/h (Hidalgo *et al.*, 2010). Esta es otra de las aplicaciones que se le podrá dar al biogas en el establo de la UNTRM, con lámpara de camiseta para iluminación de zonas estratégicas para vigilancia, lo que contribuirá a reducir el consumo de energía eléctrica para esta actividad.

El sistema de agitación del contenido del biodigestor con electrobomba, permitirá recircular el biol hacia el punto de entrada de la alimentación al BTLC, homogenizará su contenido y evitará que se forme una costra en la parte superior del sustrato en fermentación, que podría impedir el flujo del biogas hacia la cúpula del BTLC. Esta forma de agitación, además de romper las costras o evitar su formación en la superficie de la mezcla estiércol:agua contenida en el BTLC, favorece la suspensión de los sedimentables, la distribución de los microorganismos para que transformen el sustrato y se reduzca el tiempo de producción de biogas.

En la actualidad, el avance en el diseño e implementación de energías alternativas se ha convertido en una prioridad para los países en vías de desarrollo, ya que permite el aprovechamiento de los recursos naturales, disminuye los costos por reducir el uso de combustibles derivados del petróleo, además de proteger el planeta tierra (Posso, 2004). El BTLC es un sistema que permitirá procesar una gran cantidad de estiércol de ganado vacuno para producir biogas, cuyo principal componente es el metano cuyo poder de gas de efecto invernadero (GEI) es 21 veces mayor que el del CO₂ (Moncayo, 2014); sin embargo, cuando se emplea el biogas como combustible, el metano se convierte en CO₂, con lo que se reduce su poder de GEI y se protege al medio ambiente. Asimismo, un sistema de producción de biogas y bioabonos contribuye a reducir el impacto ambiental de la ganadería que según la FAO (2014), es una de las principales fuentes emisoras de GEI.

El BTLC diseñado e instalado en el establo de la UNTRM permitirá procesar el estiércol del ganado vacuno que allí se cría, para producir biogas para hacer funcionar un grupo electrógeno con el que se podrá satisfacer parte de la demanda de energía eléctrica del establo; además, será un combustible de bajo costo para calefacción, desinfección, iluminación y cocción de alimentos. Los bioabonos producidos servirán para restituir nutrientes a los campos de cultivo de los pastos para el ganado, o se podrán comercializar como abonos orgánicos para café, cacao y otros cultivos de interés económico en la región Amazonas que requieren un manejo orgánico. El BTLC también será un centro de práctica de estudiantes de ingeniería, un taller de enseñanza y difusión de la tecnología del biogas para los estudiantes de la UNTRM y de la comunidad interesada. De esta forma, la UNTRM cumplirá su función de generar y difundir conocimiento y realizar sus actividades con responsabilidad social y ambiental.

V. CONCLUSIONES

1. Se ha diseñado e instalado en la Estación Experimental Chachapoyas de la UNTRM un biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) de 170 m^3 , excavado en el suelo e impermeabilizado con geomembrana, donde se procesará el estiércol de 40 vacas lecheras que en promedio producen 600 kg de estiércol/día, en un volumen de trabajo de 126 m^3 , con un tiempo de retención hidráulico de 35 días.
2. El BTLC tiene forma de tronco de pirámide invertida con 3 m de profundidad, con base inferior de $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, base superior de $12 \text{ m} \times 9 \text{ m}$, con talud de 45° , lo que hace un volumen total de 170 m^3 .
3. La cúpula del biodigestor tendrá una altura de 1,8 m y $12 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ en su base que es el borde superior del BTLC. Podrá almacenar $133,56 \text{ m}^3$ de biogas. Entre el nivel de mezcla estiércol:agua contenido en el BTLC y su borde superior hay un volumen libre de 44 m^3 para almacenar biogas, con lo que la capacidad de almacenamiento de biogas del sistema será de $177,56 \text{ m}^3$, que equivale a 4,03 días de producción de biogas.
4. La laguna para almacenar el biol tiene forma de tronco de pirámide invertida impermeabilizada con geomembrana, de 1,5 m de profundidad, con base inferior de $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, base superior de $9 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, con talud de 45° , lo que hace un volumen total de $51,6 \text{ m}^3$.
5. La laguna para almacenar los lodos de fondo tiene forma de tronco de pirámide invertida, de 2,0 m de profundidad, con base inferior de $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, base superior de $12 \text{ m} \times 9 \text{ m}$, con talud de 45° reforzado con canto rodado y cemento, lo que hace un volumen total de $113,39 \text{ m}^3$.
6. El biogas producido se empleará como combustible para grupo electrógeno, cocina, lámpara y soplete para desinfección. Los bioabonos servirán para mejorar los suelos e incrementar la producción de los pastos para el ganado.

VI. RECOMENDACIONES

- 1- La Escuela de Ingeniería Ambiental debe emplear el sistema de procesamiento de efluentes del establo de la UNTRM, como módulo de enseñanza y prácticas para sus estudiantes.
- 2- La Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental debe organizar cursos para difusión de la tecnología del biogas, amigable con el medio ambiente, a la comunidad interesada.
- 3- El Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDESCES) de la UNTRM, debe invitar a directivos de la Dirección Regional de Agricultura y tomadores de decisión del Gobierno Regional de Amazonas, para que conozcan el sistema de tratamiento de efluentes, su funcionamiento y los beneficios para los usuarios y el medio ambiente, para propiciar su difusión a nivel de ganaderos.
- 4- La UNTRM debe difundir a través de su página web, la instalación y puesta en operación del sistema de tratamiento de efluentes del establo, con lo que cumplirá sus actividades de responsabilidad social universitaria, aportando tecnologías socialmente adecuadas de adaptación al cambio climático.

VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, F. X. y Botero, R. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogas utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra Tropical, Revista de la Universidad Earth* (2006); 2(1):49-59. Costa Rica.
- Asociación colombiana de porcicultores. (2002). *Guía ambiental para el subsector porcícola*. Fondo nacional de la porcicultura. Disponible en Internet:http://www.oiporc.com/plantilla/images/stories/pdf/3.2_MANUAL_BIODIGESTOR.pdf
- Barrena G., Miguel, Gamarra T., Oscar y Maicelo Q., Jorge. (2010). Producción de biogas en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento. *Aporte Santiaguino, Revista Oficial de la UNASAM 2010*; 3(1): 86-92. ISSN 2070-836X. Huaraz-Perú.
- Barrena G., Miguel, Taramona R., Luis, Gamarra T., Oscar y Choy W., Maximiliano. (2013). *Biodigestores tubulares para la producción de biogas*. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú 2013-07776. Lima, Perú: GRAFICA DAVISA E.I.R.L.
- Botero Botero, Raúl y Preston, Thomas R. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, desde <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/04-biodigestores.pdf>
- Cepero, L.; Savran, Valentina; Blanco, D.; Díaz Piñón, M.R.; Suárez, J. y Palacios, A. (2012).** Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes* 35(2) Matanzas abr.-jun. 2012. Versión ISSN 0864-0394. Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200009&lng=es&nrm=iso>. Accedido en 05 marzo 2016.
- Chauca Rituay, Nemecio. (2010). *Propuesta para manejo sustentable de la ganadería en Santo Tomás – Región Amazonas*. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- Comisión Nacional del Agua [CNA]. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. ISBN 978-968-817-880-5. México, D.F.

- CTBH. (2011). *Entrenamiento de la tecnología del biogás a gran escala para especialistas cubanos*. Centro de Tecnología del Biogás de Hanoi, Vietnam.
- Cueva Ancalla, B. L. (2012). *Obtención de biogas de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua*. Tesis para obtener el Título Profesional de Biólogo-Microbiólogo. Universidad Nacional Jorge Basadre, Tacna. Accesado el 24-10-2014. Disponible en: http://tesis.unjbg.edu.pe:8080/bitstream/handle/unjbg/128/22_Cueva_Ancalla_BL_F_ACI_Biologia_Microbiologia_2012_resumen.pdf?sequence=2
- DEC Manuals. (2006). *Dairying and the environment*. Pond Systems. www.dexcel.co.n2/data/usr/ACF143F.pdf. Accesado el 18 de junio del 2007.
- Detailed Description of the Three Main Dairy Digester Technologies*. Accesado el 22/marzo/2012. Disponible en: http://www.rcminternationalllc.com/RCM_Forms/RCM_Digester_Types.pdf.
- EPA (2001). *Cost Methodology Report for Beef and Dairy Animal Feeding Operations*. Engineering and Analysis Division Office of Science and Technology U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C. 20460.
- Funk, Ted. (2007). *Anaerobic methane digesters for dairy farms: Are you asking the right questions*. University of Illinois.
- Gallieri, C. (2002). *Manejo de aguas residuales*. DeLaval. Presentación en power point.
- Gropelli , E, y Grampaolli, O. (2001). *El camino de la biodigestión*. Centro de Publicaciones. Secretaría de Extensión. UNL. Santa Fe.
- Guardado Chacón, José Antonio. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogas sencillas*. Editorial CUBASOLAR. ISBN 959-7113-33-3.
- Hellenthal, Monika. (2013). *Aumento de producción de biogas – representado por un biodigestor en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - Chachapoyas, Perú*. Tesis de Maestría en Recursos Naturales y Energías Renovables. Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK) de Göttingen – Alemania.

- Hidalgo Bonilla, José A.; Maravilla Carranza, Víctor A. y Ramírez Castro, William O. (2010). Aprovechamiento *energético del biogas en El Salvador*. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. El Salvador.
- Jäger, Klaus; Isabella, Olindo; Smets, Arno H.M.; van Swaaij, René A.C.M.M. & Zeman, Miro. (2014). *Solar energy Fundamentals, technology and systems*. Delft University of Technology. Netherland.
- Julca Noriega, Jóhmer. (2012). *Rendimiento del biogas como combustible para cocina e iluminación producido en digester tubular en el distrito de Providencia, Luya – Amazonas*. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Perú.
- Junker, Beth. (2003). [Multipurpose fermenter design: critical considerations: a design that accommodates both present and possible future applications can be advantageous to process development and scaleup efforts. \(Feature Report\)](https://www.highbeam.com). Chemical Engineering. Access Intelligence, LLC. February 2003. *HighBeam Research*. 10 Mar. 2018 <<https://www.highbeam.com>>.
- Laines Cánepa, José Ramón y Sosa, Olivier. (2013). Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. *Ingeniería*, Enero-Abril, 57-65.
- Lara, E.S. e Hidalgo, M.B. (2011). *Diseño de un biorreactor y conducción de biogas generado por las excretas de ganado vacuno, estación Tunshi – Espoch*. Ecuador. Accedido el 24-10-2014. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/1652/1/236T0056.pdf>
- L’Institut de L’Elevage. (1996). *Bâtiments d’élevage bovin, porcin & avicole: réglementation et préconisations relatives à l’environnement*. Paris. 140p.
- Longatt, F. (2007). *Introducción a los sistemas de transmisión y generación*. Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental Politécnica de las Fuerzas Armadas. Maracay, Venezuela.
- Moncayo, Gabriel. (2014). *Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. Biodigestores tropicalizados*. Alemania: Aqualimpia Engineering.

- Mosquera, B. (2010). *Abonos orgánicos. Protegen el suelo y garantizan alimentación sana*. Fondo para la Protección del Agua-FONAG. Accesado el 03-04-2018. Disponible en http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/abonos_organicos.pdf.
- Nennich., T.D.; Harrison, J.H.; VanWleringen L.M.; Meyer, D.; Heinrichs, A.J.; Weiss, W.P.; St-Pierre, N.R.; Kincaid, R.L.; Davidson, D.L. and Block, E. (2005). Prediction of manure and nutrient excretion from dairy cattle. *Journal of dairy science*. 88:3721-3733. American dairy science association
- Núñez Guzmán, Luis Daniel.** (2012). *Básicos Lecheros; Ganadería bovina y emisión de gases de efecto invernadero*. (5ta. Edición). México: International Thomson Editores.
- Olaya Arboleda, Yeison y González Salcedo, Luis O. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *Básicos Lecheros; Ganadería bovina y emisión de gases de efecto invernadero*. (5ta. Edición). México: International Thomson Editores.
- Pizarro, C.; Mulbry, W.; Blersch, D. and Kangas, P. (2006). An economic assessment of algal turf scrubber *technology* for treatment of dairy manure effluent. *Journal of ecological engineering*. (Article in press) Elsevier.
- Pezo, A.; Acosta, B.; Velásquez, J.; Veen, M. y Garay, R. (2011). *Producción de energía renovable (biogas) a partir del estiércol del ganado bovino en la Estación Experimental Agraria El Porvenir – INIA*. Accesado el 24-10-2014. Disponible en: [http://situacion_actual_y_mejoras_del_proyecto_inia_lv%20\(1\).pdf](http://situacion_actual_y_mejoras_del_proyecto_inia_lv%20(1).pdf)
- Posso, F. (2004). *Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: sistema energético basado en energías alternativas*. Trabajo de investigación, Universidad de Los Andes, Táchira, Venezuela.
- Rodríguez Venandy, Carlos A. (2012). *Producción de biogas a partir de bagazo cervicero*. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Disponible en <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/114955>.
- Salazar, J.L.; Amusquivar, C.; Llave, J.J.; Rivasplata, C. (2012). *Producción de biogas y biol a partir de excretas de ganado: Experiencias en la Ciudad de Tacna*. Accesado

el 24-10-2014. Disponible en: <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/6.pdf>

Schlaefli, F. (2010). *Tratamiento de residuos orgánicos del comedor universitario de la UNALM en un biodigestor semicontinuo para la producción de biogás y biol.* Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias, Perú.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2013). *Especificaciones técnicas para biodigestores pequeños tipo laguna.*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México.*

Sener. (2006). Secretaría de energía. www.sener.gob.mx

Silva Vinasco, Juan P. (2002). *Tecnología del biogas.* Universidad del Valle, Colombia – Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Accedido el 03-04-2018. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>

Silva, Amanda; Gomez, Arturo; Landazury, Bonnie y Preciado, Bryan. (2013). Evaluación de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov). *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 6(1) 36-43.

Tarchitsky, J. (2003). *Reporte productores de Alpura.*

Tejedo Soberón, Evans y Yopán Chocaca, Edwin Jesús. (2014). *Rendimiento de biogas como combustible en un grupo electrógeno de 1 kW.* Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú.

Twidell, John & Weir, Tony. (2015). *Renewable energy resources.* Third edition. Routledge, Taylor and Francis Group. London and New York.

- Van Horn; Wilkie, A.C. ; Powers, W.J. and Nordsted, R.A. (1994). Components of dairy manure management systems. *Journal of dairy science*, 77: 2008-2030.
- Varnero Moreno, María Teresa. (2011). *Manual de biogas*. Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Global Environment Facility (GEF). Santiago de Chile.
- Victória de Oliveira, P.A. y A. Pagani da Silva. (2006). *As edificações e os detalhes construtivos voltados para o manejo de dejetos na suinocultura*. ISSN 0101-6245. Junho 2006. EMBRAPA, SC, Brasil.