

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO EN LA FINCA “RANCHO SANTA ESTHER” DEL SECTOR “LA DELICIA” PARROQUIA TULCÁN, CANTÓN TULCÁN, PROVINCIA DEL CARCHI, ECUADOR.

Amanda PAZMIÑO¹

¹ Carrera de Ingeniería en Biotecnología, Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí, Ecuador.

Resumen: La finca “Rancho Santa Esther” cuenta con ganado lechero y el manejo del estiércol generado durante el ordeño ha sido enviado a la acequia, sin ningún tratamiento previo, lo que se ha constituido en un verdadero problema ambiental y de salud. Este proyecto diseña, construye e implanta un digestor anaerobio de flujo continuo, para tratamiento de estiércol bovino, en primer lugar se evaluó la cantidad y calidad del estiércol generado diariamente, se determinó los parámetros de diseño y con ello se realizó el dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio, el sistema de digestión anaerobio se operó durante 107 días, el mismo que fue directamente afectado por la temperatura fría de la zona (12-18°C), debido a que la velocidad del proceso de digestión depende directamente de ella, obligando a trabajar al equipo en condiciones psicofílicas; durante el monitoreo; la temperatura fue el parámetro que determinó también la producción de CH₄ llegando a elevarse la campana del gasómetro 34,20 cm, lo que significó en promedio 54,64 Litros CH₄/día; el biogás presentó una composición > 45% de CH₄ y 38,4% de CO₂, lo que hizo que fuera un gas inflamable. Además se obtuvo biol, que presentó valores de N₂, C y P₄ dentro de los rangos bibliográficos, sin embargo la cantidad de coliformes no fue óptimo puesto que en lugar de obtenerse cero se obtuvieron 430 UFC`s; finalmente al comparar la DQO y DBO del estiércol con la del biol se obtuvo una eficiencia de remoción del 71,20% y del 82,25% respectivamente.

Abstract: The farm “Rancho Santa Esther” has milky cattle and all the manure generated during the process of milking, has been sent to the ditch, without any previous treatment, which has become a real environmental and health problem. This project designs, constructs and implements a continuous flow anaerobic digester for treatment of cattle manure, first, the quantity and quality of the daily manure produced was evaluated, then the design parameters were determined and finally the anaerobic digestion system was dimensioned. The anaerobic digestion system was operated during 107 days, and it was directly affected by the cold temperature of the zone (53,6-64,4°F). The speed of the digestion process depends directly on the temperature, forcing the equipment to work in psychophilic conditions. During the monitoring process, temperature was a parameter that determined the production of CH₄, and it made gasometer bell to reach 34,20 cm, which was equal to have an average of 54,64 Liters CH₄/day; the biogas presented a composition >45% CH₄ and 34,4% CO₂, making it an inflammable gas. In addition, biofertilizer was obtained and it showed values of N₂, P₄ and C that were in the bibliographic ranges. However the number of coliformes was not optimal, because instead of having a measure of zero, 439 CFU were located. Finally comparing COD and BOD manure with the biofertilizer, the removal efficiency was 71,20% and 82,25% respectively.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de leche en la Comunidad Andina (Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú), alcanzó durante el período 2000-2006 las 8 713 000 TM en promedio, con un ritmo de

crecimiento anual del 2,8%, superior a la tasa de crecimiento poblacional humano que es de 1,52%. El principal productor en la sub-región es Colombia con el 57%; en segundo lugar está Ecuador con un 26% seguido de Perú con el 14% y Bolivia 3% (Torres, 2009).

Según el último censo agropecuario, el Ecuador cuenta con 5,5 millones de cabezas de ganado (MAGAP, 2012), de los cuales 0,9% corresponden a ganado pura sangre de leche, 1,4% a ganado mestizo con registro, 42,4% a ganado mestizo sin registro y 54,1% a ganado criollo (Agroecuador, 2011).

Expertos nacionales y extranjeros han establecido que las mesetas de la provincia del Carchi constituyen zonas óptimas para la crianza de ganado, tanto de carne como de leche aportando el 4,78% de la producción de leche en el total nacional (Agroecuador, 2011). El cantón Tulcán es el de mayor superficie dedicada a pastos y también el de mayor población bovina (Torres, 2009).

La finca “Rancho Santa Esther” propiedad del señor José María Acosta Yépez, desde los años 50 se ha caracterizado por ser una finca productora de papas y leche, cuenta con una extensión de 56 hectáreas; cuatro de ellas sembradas con papas y el resto con pasto. Actualmente, cuenta con 98 animales, de los cuales, 18 son terneras, 25 vaconas y 55 vacas, de estas 36 son lecheras y su ordeño se lo realiza dos veces por día. A fin de mantener la asepsia durante este proceso, se debe lavar el potrero antes y después de la salida de los animales, durante todo este tiempo el manejo del estiércol generado en este proceso ha sido de manera tradicional, es decir, que han sido enviados a la acequia, sin ningún tratamiento previo, lo que se ha constituido en un verdadero problema ambiental y de salud, pues la acequia es la encargada de dotar de agua no solo a la finca “Rancho Santa Esther” sino a otras fincas por las que pasa este canal.

Hoy en día existe una creciente preocupación por los efectos al medio ambiente, generados por la descarga de residuos provenientes de la actividad ganadera, de ahí que la FAO propone un prototipo denominado “Biodigestor plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas”, el cual resulta económico y viable para las regiones rurales (FAO, 1992).

Ecuador, no se ha quedado atrás en el tema legislativo y en la actualidad, existe mayor control ambiental por parte del Ministerio del Ambiente con la LEY FORESTAL Y DE CONSERVACIÓN DE ÁREAS NATURALES Y VIDA SILVESTRE y la LEY DE LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN; sumado al reajuste de costosas multas al contaminar las aguas de los ríos y la tala de árboles para consumo de leña, impulsando así la necesidad de generar una fuente alterna de energía y calor, que disminuya costos de producción de la Finca (Ministerio del Ambiente, 2004).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y mirando las necesidades en particular de la Finca “Rancho Santa Esther”, se propuso diseñar, construir e implantar un digestor anaerobio de flujo continuo, con ciertas modificaciones a lo que la FAO recomienda, debido a que, como lo expone CEDECAP-GREEN EMPOWERMENT (2009), los biodigestores de polietileno poseen escasa resistencia a la radiación solar, degradándose rápidamente incluso en menos de un año si es expuesto directamente al sol. El polietileno no permite operaciones de soldadura o pegado, obligando así a las operaciones de amarre de los tubos de carga y descarga mediante ligas de neumáticos; haciendo que la manipulación pueda llevar a errores de instalación como rupturas en el plástico, deformación de las tuberías de carga y descarga por exceso de tensión de las ligas de neumáticos, etc; debido a su forma se hace muy complejo el control de temperatura y pH dentro del digestor, al ser un material frágil, existen riesgos en su transporte e instalación, finalmente no es sencillo parchar eventuales huecos en el material.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

ETAPA PRELIMINAR: Se realizó una caracterización físico-química y microbiológica de la muestra de estiércol con el fin de saber los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y cantidad de materia seca.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN: El digester anaerobio se diseñó determinando los parámetros para su funcionamiento, para lo cual se consideró los factores que intervienen en el proceso de degradación orgánica para este caso en particular. Para el dimensionamiento del tanque recolector, se planificó recoger el estiércol que se generó solamente durante la estancia del ganado en el ordeño, durante seis días. Para el dimensionamiento del tanque digester se tomaron en cuenta varios aspectos: volumen funcional del digester, cálculo de la carga inicial y cálculo de la carga regular. Posteriormente se procedió a la construcción del equipo digester.

OPERACIÓN DEL SISTEMA ANAEROBIO: El sistema fue operado y monitoreado desde que se realizó el llenado del tanque digester con el inóculo y la carga inicial, hasta el día en que se finalizó el proyecto con la obtención de un volumen regular de biogás y con los respectivos muestreos de biol y gas. Las cargas regulares fueron realizadas por los trabajadores de la finca, previamente capacitados para recolectar y homogenizar el estiércol, registrar el pH, cargar al digester y retirar el biol correspondiente a cada día previo a la carga.

La carga inicial consistió en inóculo y sustrato, el 50% del volumen del inóculo fue lodo recogido de los almacenamientos de agua cercana (agua empozada) y el 50% restante fueron heces recolectadas días antes y fermentadas al sol durante 5 días (López G., 1992). Junto con el inóculo se cargó el sustrato compuesto solamente de agua y estiércol fresco, que se mantuvieron condiciones aerobias durante 5 días en el tanque digester para la estabilización de las bacterias acidogénicas (Guevara, 1996) citado por (Acosta, 2011). En el período de adaptación y crecimiento de las bacterias anaerobias, no se realizó cargas regulares, pero siempre se mantuvo el monitoreo de los parámetros operativos. La carga regular se realizó diariamente, después de la etapa de estabilización hasta la finalización del

proyecto. Como se mencionó anteriormente fueron los trabajadores los que se encargaron de realizar las cargas regulares y el control de los parámetros que diariamente fueron registrados en la bitácora.

PROCESAMIENTO DE RESULTADOS: Se analizaron tanto análisis físicos, químicos microbiológicos y de emisiones gaseosas del biol y biogás generado, se realizó el análisis de eficiencia del proceso basado en la DQO y DBO₅ y finalmente se realizó un análisis descriptivo de los datos de la generación de biogás.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ETAPA PRELIMINAR: Como bien lo menciona Bavera & Peñafort (2006), la heces bovinas difieren de casi todas las especies animales por su alto contenido de agua, lo que corrobora el haber obtenido 89,12% de humedad. Además al haberse presentado las heces con una consistencia de “papilla” espesas, indica que el ganado disponía de una dieta balanceada, una correcta masticación, rumiación e insalivación debido a que la estratificación que forma en el rumen es apropiada, demostrándose así con un pH de 6,8. Con una digestibilidad del 60 al 65% del alimento ingerido (Bavera & Peñafort, 2006), que implica tener elementos no digeridos, que se traducen en 10,88% de sólidos totales; que Jarauta (2005), cataloga como un contenido bajo en sólidos, pero aún así dentro del rango apropiado para una digestión anaerobia. En cuanto a la DBO₅ y DQO, que representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente o biológicamente la materia orgánica; los resultados que se presentan dentro de los rangos, sin embargo en el caso de la DBO₅, los resultados obtenidos exceden en 1 100 mgO₂/L, lo que podría causar un efecto de lavado de las bacterias es decir salen del reactor con la corriente de salida, aumentar moderadamente la presencia de ácidos volátiles e incrementar moderadamente la producción de gas (Jarauta, 2005). Los

análisis de los porcentajes de Nitrógeno, Fósforo y Carbono que son importantes dentro de la relación óptima de nutrientes, muestran que el Nitrógeno estuvo dentro del rango óptimo señalado por Jarauta (2005), sin embargo en el caso del carbono, este estuvo fuera del rango, lo que indicó que para que exista una relación óptima de C/N deberá realizarse una dilución de las excretas el momento de su ingreso al digestor, con el fin de mantenerse dentro de los rangos de la relación de C/N que van desde 15/1-45/1 siendo mejor entre 20/1-30/1. (López A., 2009). El análisis microbiológico, demostró que los resultados de UFC de E. coli y de coliformes totales, muy numerosas para ser contadas, concluida la digestión anaerobia su número debería disminuir (De La Torre, 2008).

DISEÑO: Debido a que el estiércol bovino es generado todos los días, se determinó que el régimen de alimentación al tanque digestor debía ser continuo; no se consideró tener agitación mecánica, principalmente por razones de tamaño del tanque (1000 Litros) y a factores económicos; 75% del volumen total fue determinado como “volumen funcional” es decir volumen tope al que se llenaría el digestor (Metcalf & Eddy, 1991); finalmente por recomendaciones de López, G (1992), se decidió contar con un 15% de inóculo para un buen inicio de la digestión anaerobia.

El tiempo estimado de retención hidráulica fue de 60 días, debido a que como Martí J. (2008), menciona en su libro Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares, constituye un periodo referencial para climas fríos, pues gracias a la información del Instituto de Meteorología e Hidrología, se esperaba tener temperaturas entre 12 y 18°C como las más altas en la Finca “Rancho Santa Esther”, esto justifica también porque se decidió colocar un sistema aislante con fibra de vidrio, pues se necesitaba retener la mayor cantidad de calor dentro del digestor especialmente durante la noche. Al hablar de una proporción adecuada de sólidos totales para la entrada al proceso

de degradación anaerobia, Jarauta (2005) recomienda que sea entre 10-40%, sin embargo, López, G. (1992) menciona que cuando la cantidad de materia orgánica es muy alta puede llegar a ser de hasta 5%; el porcentaje de carbono era muy alto, se decidió por tanto que el porcentaje de sólidos sería del 5%. Una vez observado el modo en el que opera la Finca, se vio la necesidad de tener un tanque recolector, pues daba la oportunidad de ir recolectando el estiércol que se generaba en el día. Finalmente, también se consideró la construcción de un tanque gasómetro que recolectaría el gas obtenido durante la digestión anaerobia.

CONSTRUCCIÓN:

Tanque Recolector. Los resultados de la producción de estiércol durante seis días, donde se obtuvo un total de 131,3 kg con un promedio de 21,9 kg de excretas por día. Esta cantidad de excretas obtenidas por día, difiere de la registrada en Botero & Preston (1987), González & Sandoval (2005), Martí J. (2008), entre otros textos que tratan de diseño de digestores, en donde se toma en cuenta el peso del animal y el número total de ellos; sin embargo esto puede explicarse ya que el estiércol que se recolectó, pesó y registró, es solamente del lapso en el que el ganado entra al ordeño. El proceso de ordeño tiene una duración entre una hora a una hora y cuarto máximo, se pudo observar que no todas las vacas evacuan en ese instante, ya que para llegar recorren un largo trayecto durante el cual van liberando las excretas dificultándose su recolección. Para la realización de este proyecto se tuvo acceso a varios tanques de 200 Litros marca PLASTIGAMA, una vez analizado que en promedio se obtenía 21,9 kg estiércol/día, se decidió que se utilizaría uno de ellos para destinarlo a ser tanque recolector.

Tanque gasómetro:

Se disponía de un tanque de 1000 Litros de capacidad, el cual se adaptó a las necesidades de la Finca, se calculó el volumen funcional, obteniendo, un valor de 750 Litros que será el

máximo a llenarse con la mezcla de estiércol y agua.

Se calculó el inóculo correspondiente al 15% del volumen funcional que es de 750 Litros, quedando, obteniéndose 113 Litros de inóculo, de los cuales el 50% fue lodo recogido de los almacenamientos de agua cercanos a la Finca, y el 50% restante fueron heces recolectadas con anticipación y dejadas fermentar al sol.

Se calculó la relación C/N: _____

Con los resultados obtenidos del análisis de excretas, se realizó un diagrama de balance de masas (Figura 3.1), quedando de la siguiente manera:

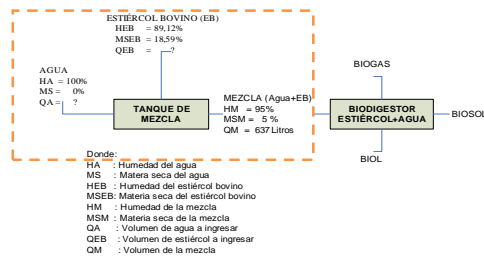


Figura 3.1. Diagrama de balance de masas.
Elaborado por: (Autor).

Tabla 3.1. Datos para el cálculo de cantidades de sustrato para carga inicial.

Componente	Datos	Unidades	Valor
AGUA	Fración del % de Humedad	-	1
	Fración del % de Materia seca	-	0
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros ¹⁵	Q _A
ESTIÉRCOL BOVINO	Fración del % de Humedad	-	0,8912
	Fración del % de Materia seca	-	0,1859
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	Q _{EB}
MEZCLA	Fración del % de Humedad	-	0,95
	Fración del % de Materia seca	-	0,05
	Volumen del sustrato ¹⁶	Litros	637

Elaborado por: (Autor).

Balance de masa utilizando humedad

Balance de masa utilizando materia seca

$$= 171,33 \text{ y } = 452,46$$

La relación agua/estiércol:

Carga regular.

Cálculo del caudal diario de entrada y salida. Para calcular el caudal diario que debe ser cargado y por tanto también descargado del digestor.

Donde:

V_f: volumen funcional del digestor

: Caudal de entrada de sustrato

θ_h: Tiempo de retención

Balance de masa para la carga regular. Al igual que para la carga inicial, en la carga regular se utilizó un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para conocer la cantidad de estiércol bovino y agua que deben ingresar por día al digestor anaerobio.

Tabla 3.2. Datos para el cálculo de sustrato para la carga regular.

Componente	Datos	Unidades	Valor
AGUA	Fración del % de Humedad	-	1
	Fración del % de Materia seca	-	0
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros ¹⁵	Q _A
ESTIÉRCOL BOVINO	Fración del % de Humedad	-	0,8912
	Fración del % de Materia seca	-	0,1859
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	Q _{EB}
MEZCLA	Fración del % de Humedad	-	0,95
	Fración del % de Materia seca	-	0,05
	Volumen del sustrato ¹⁹	Litros	13

Elaborado por: (Autor).

Balance de masa utilizando humedad

Balance de masa utilizando materia seca

$$= 3,49 \text{ y } 3,50 \text{ y } = 9,23 \text{ y } 9$$

La relación agua/estiércol:

¹ (Martí J., Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares, 2008).

Se adaptó un tanque cuadrado de 1m^3 (1000 Litros) de capacidad, usado anteriormente para el almacenamiento de químicos, lavado previamente. En la tapa que viene con el digestor se colocó un adaptador de manera que pueda ser colocado un tubo PVC de 2", para ser utilizado como entrada de estiércol tanto en la carga inicial como en las cargas regulares. El tanque cuenta con una válvula en la base, al cual se le colocó un adaptador y una unión para la salida de los lodos de digestión, además se realizó dos orificios más, para la salida del fertilizante líquido y otro para el control de la temperatura (sensor termocupla).

Gasómetro o sistema de almacenamiento de biogás.

Cálculo de la producción diaria de gas. La estimación del volumen de gas que se generaría durante la digestión anaerobia, se la determinó así:

$$ST = \frac{(3,5 \text{ kg}) \times 0,17}{0,6 \text{ m}^3} = 0,99 \text{ kg/m}^3$$

$$SV = \left(0,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times 0,77 = 0,762 \text{ kg/m}^3$$

Finalmente la producción de biogás que se obtendría por día.

$$PB = (0,13) \times 0,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,099 \text{ m}^3 \text{ biogas.}$$

Así, un digestor con un volumen funcional de $0,750 \text{ m}^3$, significa que cada día se va a producir:

$$PB/\text{día} = (0,750 \text{ m}^3) \times 0,099 = 0,074 \text{ m}^3 = 74,25 \text{ Litros.}$$

A partir de esta producción de biogás (74,25 L) se diseñó un sistema de almacenamiento de 120 Litros, puesto que se disponía de una caneca plástica de este volumen.

El sistema consta de dos tanques de polietileno azules marca PLASTIGAMA. Al primer tanque cilíndrico vertical de 200 Litros, se le colocó en la parte más baja un

adaptador conectado a una válvula de bola, para el desfogue de agua; además cuenta con otro adaptador que se conectó con el tanque digestor por un tubo de PVC por donde ingresa el biogás. El otro tanque de 120 litros, actúa como campana y almacena el biogás, cuenta con un adaptador conectado a una manguera para la salida del gas; además tiene un orificio en la mitad por donde entra un eje que guía la subida/bajada del tanque esto unido a un armazón de metal que le proporciona estabilidad, cabe mencionar que el eje se eleva o desciende por fuera garantizando así que el tanque campana esta sellado para evitar cualquier posible fuga de gas.

Accesorios. Para la regulación de la entrada de estiércol se utilizó una válvula de compuerta y cerca de la entrada al tanque digestor se colocó una "Y" de PVC, con su respectivo tapón roscado para colocar el regulador de pH o realizar una recirculación de ser necesario. El tanque digestor cuenta con un panel de control en el que están colocados el sensor de temperatura interna (termocupla) y el termómetro. Finalmente la tubería de salida del biogás cuenta con un filtro para el tratamiento de sulfuro de hidrógeno.

Análisis de parámetros operativos.

Monitoreo de pH. Durante 107 días que se monitoreo el digestor, se registró un pH promedio de 6,21.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0, esto debido a la gran susceptibilidad que presentan los microorganismos metanogénicos frente a las variaciones de pH; manteniendo el valor de 6,21, dentro de los rangos favorables. El descenso del pH luego de que empezaran las cargas regulares se justifica, debido a la excesiva carga orgánica volumétrica que recibió el digestor, que hacía que los ácidos grasos volátiles (AGV) y el CO_2 se acumularan; por ello no se realizó cargas durante la regulación de pH para dar

oportunidad a que los AGV se consuman (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011).

Monitoreo de temperatura. La temperatura de operación del equipo fue un punto determinante dentro de este proyecto, pues constituía un desafío al encontrarse la Finca en una zona fría y alta, expuesta a vientos y heladas nocturnas.

Por otra parte, por motivos de presupuesto los primeros 60 días se trabajó sin invernadero, con el tanque forrado con lana de vidrio y plástico, sin embargo al notarse una baja actividad bacteriana y pobre presencia de gas, se optó por poner plástico de invernadero a partir del día 61, manifestándose un cambio en la temperatura que rodeaba al equipo y la estabilización en la temperatura en el interior del digestor.

Con la ayuda de un termómetro ambiental y una termocupla, se midió simultáneamente la temperatura ambiental y la temperatura interna del tanque. Durante los primeros 61 días se registró en promedio: temperatura ambiente de 19,88 °C, y temperatura del equipo 21,34 °C, en comparación con las temperaturas registradas a partir de la implementación del invernadero hasta la finalización del proyecto, donde se registró una temperatura ambiente promedio de 29,37°C y 22,42°C dentro del digestor. Luego de estos análisis se pudo determinar que el digestor trabajó en un rango psicrófilico, en donde MINERGIA;PNUD;FAO;GEF (2011) determinan que existe un rango de operación mínimo de 4–10 °C, un óptimo de 15-18 °C y un máximo de 20-25 °C.

Los procesos anaeróbicos al igual que otros procesos biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura, de ahí que MINERGIA;PNUD;FAO;GEF (2011), mencionan que es imprescindible que se la controle, razón por la cual se consideró desde el inicio la importancia de acoplar un aislante térmico al tanque, cuya función fue la de retener todo el calor posible durante las horas de sol. Sin embargo al seguir registrándose temperaturas bajas, se decidió construir un

invernadero con plástico amarillo especial para retener radiación infrarroja, con el objetivo de que existiera transferencia neta de calor hacia el líquido contenido en el tanque digestor, y que durante las noches disminuya la pérdida por radiación y convección desde el digestor hacia el ambiente exterior y además que todo el equipo se proteja de heladas y granizadas. No obstante Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006), expresan que el uso del invernadero podría conllevar a oscilaciones térmicas día-noche en la capa superior del líquido del digestor, que en principio serían perjudiciales para la estabilidad del proceso de digestión, pero según Alvarez, Villca, & Liden (2006) la actividad metanogénica es suficientemente robusta como para resistir a variaciones cíclicas diarias de temperatura de hasta 14°C, concentrándose la producción de biogás durante las fases de alta temperatura.

Tiempo de retención. En la realización de este proyecto el tiempo de retención fue influenciado por la temperatura fría de la zona, puesto que la velocidad del proceso de digestión depende directamente de ella, ya que disminuye la tasa de crecimiento de las bacterias, tal es así que Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006), determinan que el rango óptimo para una degradación anaerobia es entre 32°C a 38°C, es decir, un rango mesófilico, también menciona que en el caso de la digestión anaerobia psicrófila de estiércol vacuno el proceso se vuelve más lento, obligando a tener tiempos de retención mayores a 100 días como lo precisa MINERGIA;PNUD;FAO;GEF (2011), de ahí que se mantuvo en monitoreo el digestor durante 107 días. Además, Martí (2008), Bravo & Cosquillo (2011) y Botero & Preston (1987), argumentan que 60 días es el tiempo de retención para zonas frías, sin embargo como se verá más adelante, para este proyecto se hizo necesario 24 días más de lo estimado para generar gas de calidad.

Biogás.

La cantidad de gas generado diariamente fue reportada por el desplazamiento del tanque invertido del sistema de recolección de gas.

Producción de biogás en función del pH. El pH tuvo un papel importante en la generación de gas metano, si bien es cierto el volumen no se vio afectado, se registraron los niveles más altos de gas en las etapas en que el pH bajó, pues el gasómetro llegó a levantarse 40 cm, sin embargo el gas obtenido no se encendía; esto podría explicarse como lo menciona Rodríguez (2004), lo que se estaba generando era una fermentación ácida, es decir, reduciendo la actividad de los microorganismos metanogénicos y por ende provocando más acumulación de ácido acético e Hidrógeno, en este punto las bacterias que degradan el ácido propiónico son severamente inhibidas debido a que aumenta la presión de H_2 , causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, lo cual conduce a tener un gas con un alto contenido de dióxido de carbono y bajo contenido de metano (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011); sin embargo a partir del día 89 el pH se mantuvo en 7, generando una producción de gas que también se mantuvo en 34 cm, con la presencia de llama, indicando que la acidificación había sido corregida y lo que se estaba dando era una fermentación metanogénica.

Producción de biogás en función de la temperatura. Desde el día 44 al día 61, en donde no se contaba con invernadero se registró en promedio que el tanque se desplazó 11,56 cm, mientras que a partir del día 62 en adelante ya con el invernadero se obtuvo un promedio de 34,20 cm. de elevación.

Según Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006) la producción específica de metano depende directamente de la temperatura y aunque no existe un modelo para predecir la producción de metano en función de esta, se considera que la producción de biogás se duplica por cada $10^{\circ}C$ que aumente la temperatura, lo que justifica porque la producción de gas aumentó drásticamente luego de que se colocó el invernadero, pues la temperatura que rodeaba al digestor dentro del invernadero aumentó de $19,88^{\circ}$ a $29,37^{\circ}C$ haciendo que por

consiguiente se eleve también la temperatura del digestor de $21,34$ a $22,42^{\circ}C$.

Producción de biogás en función del tiempo de retención. La producción de gas se mostró nula durante los primeros 43 días, la cantidad de gas aumentó progresivamente durante los días posteriores (día 44 al día 54) y fue en ascenso, hasta el día 89 en donde se observa como la cantidad de producción de gas se mantuvo regular hasta la finalización del proyecto, sin embargo entre los días 44 y 88 la cantidad de gas reportada es variable.

Sogari (2003) menciona en su estudio "*Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos*" al Dr Shulz quien llevó a cabo experimentos con el fin de contar con mayor información sobre la duración de la digestión, en el cual concluye que la generación de gas describe una curva en función exponencial, a medida que aumenta el tiempo la curva crece hasta un t determinado para el cual la generación de gas permanece constante, punto en el cual la producción de gas metano ha alcanzado el máximo valor posible; no obstante los datos experimentales obtenidos en este proyecto no permiten obtener la curva característica que se menciona, debido a que durante los primeros días ocurrió probablemente una fermentación acidogénica y no metanogénica lo que hacía que los valores de producción de gas se vean afectados notablemente. Además existió una variación bastante fuerte de temperatura antes y después de la colocación del invernadero y entre el día y la noche, lo que pudo ocasionar un choque térmico en las bacterias metanogénicas, afectando así su activación; sin embargo al finalizar el proyecto se observa como la producción de gas fue regular llegando al tiempo t que se menciona dicho estudio.

Evaluación del volumen de gas generado. Durante 107 días de monitoreo donde se registró un promedio de $54,64$ L/día o $0,05m^3/día$.

El haber obtenido un promedio de 0,05 m³ de gas al día, confirmó que el sistema operó en condiciones psicrófilas, coincidiendo así con los resultados de Alvarez, Villca, y Liden (2006) que muestra una producción de 0,02-0,04m³ biogás/m³·día como resultado de la digestión de estiércol de vacuno a 11°C en laboratorio, además cita a Daxiong *et al.* (1990) cuya publicación en “*Revisión del programa Chino de biogás*”, reportan una producción media de biogás de 0,05-0,1m³/día durante el invierno chino (6-10°C).

Por consiguiente, 0,05 m³ de producción de gas se encuentra dentro del rango esperado, debido a las condiciones climáticas como las de la Sierra Andina, donde la temperatura media anual difícilmente supera los 10°C (Instituto de meteorología e hidrología, 2012). En consecuencia, puede estimarse que la disminución en la cantidad de biogás producida durante los meses fríos es considerable, pudiendo pasar de 1,7m³/día durante el verano (26°C) a 0,1m³/día durante el invierno (12°C) (Poggio, Ferrer, Batet, & Velo, 2006).

Otra de las razones, por la cual se obtuvo una baja cantidad de gas se podría explicar por los comentarios de Jarauta (2005), quien establece que el estiércol de los rumiantes, particularmente el vacuno es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, puesto que este tiene un contenido elevado de bacterias metanogénicas, pero por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de sustratos por dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa.

Análisis cualitativo de biogás.

Se realizaron ocho mediciones de las cuales se seleccionó las tres mejores, desde la válvula de salida del tanque digestor (posterior al filtro de ácido sulfhídrico), entre

los análisis se midió metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno.

Para caracterizar el gas se tomó en cuenta principalmente la concentración de CO₂ y CH₄, puesto que los porcentajes de estos cambian la composición del biogás, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Composición de dióxido de carbono y metano en el biogás.

Muestra	%CO ₂	% CH ₄
1	38,41	> 45%
2	38,38	> 45%
3	38,42	> 45%

Elaborado por (Autor).

El resultado obtenido muestra que en promedio el porcentaje de CO₂ fue de 38,40% y mayor a 45% de metano, al finalizar el proyecto.

Los porcentajes de CO₂ y CH₄ varían de acuerdo a la bibliografía consultada, así (MINERGA;PNUD;FAO;GEF, 2011) menciona porcentajes entre, 55-70% de metano y 30-45% de CO₂; por su parte De La Torre (2008) menciona que los componentes del biogás varían en función del sustrato, tal es así que para excretas bovinas el porcentaje de CH₄ está entre 30-80% y el de CO₂ entre 30-50%; (Jarauta, 2005) presenta un porcentaje de 40-70% de metano y 30-60% de CO₂, colocando a los resultados obtenidos entre los óptimos para ser considerado como gas incoloro e inflamable, como se muestra en la Figura 3.2, el gas fue lo suficientemente inflamable como para encenderse.

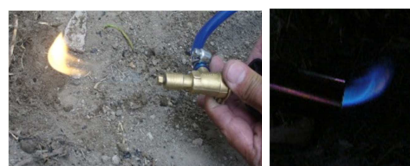


Figura 3.2. Gas metano encendido.

Elaborado por (Autor).

Biol.

Análisis cualitativo de biol. La determinación de las propiedades físico-químicas de la muestra del efluente al final de la operación, fueron realizados por el Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 3.4. Análisis del biol generado durante la digestión anaerobia.

Parámetro	Unidad	Resultado biol	Dato Referencia	Fuente Bibliográfica
pH	-	7,02	7,3	Ramos citado por (Santamaría, 2006)
Sólidos Totales	mg/L	9262	*22	(Santamaría, 2006)
DBO ₅	mgO ₂ /L	733,4	*	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
DQO	mgO ₂ /L	1354	*	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
Nitrógeno	%	0,12	0,092	(Santamaría, 2006)
Fósforo	%	0,21	0,31	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
Carbono	%	0,44	0,47	(Santamaría, 2006)
Coliformes totales	NMP/100L	430	0	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)

Elaborado por (Autor).

Mejía (1996), citado por Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008) señala que las características del sustrato suministrado al digestor anaerobio son de gran importancia, ya que los requerimientos nutrimentales de los microorganismos anaerobios son especiales, debido a su lento metabolismo y a que la regeneración de las nuevas células también es muy baja, además Santamaría (2006) menciona que para generar un biol de mayores propiedades se deberá enriquecer el biol con el uso de fitoreguladores, así como de sus precursores, como la adición de alfalfa picada en un 5% del peso total de la biomasa o adicionando vísceras de pescado para un mayor contenido en fósforo, además de agregar sales minerales naturales y realizar un control continuo de C, N, O, N y P.

Es importante considerar que el objetivo de este proyecto era el de generar biogás por lo que no se añadió ningún suplemento, ni sales minerales a la mezcla que ingresaba al digestor, sin embargo como se observa en la Tabla 3.4, los resultados obtenidos concuerdan con la bibliografía que trata del biol obtenido de estiércol de ganado vacuno. El pH se mantuvo neutro, el nitrógeno y el carbono también resultaron muy cerca de lo

que Santamaría (2006) menciona, sin embargo, el porcentaje de azufre resultó inferior en relación a lo que menciona Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008). En el caso de los coliformes totales se presentó un número elevado en relación con lo mencionado por Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008), quienes señalan que el valor final fue de cero, esto se puede justificar argumentando que posiblemente faltó tiempo de digestión anaerobia y la temperatura para poder eliminar el remanente de bacterias.

Mientras que en relación con los sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles no existe un parámetro definido, pues depende del afluente que ingresa al digestor, sin embargo, la calidad del efluente obtenido luego de la digestión, varía de acuerdo a la cantidad de sólidos totales contenidos en ésta, ya que estos sólidos son los que sirven de alimento a los microorganismos reponsables de la biodigestión, por ello entre mayor sea la concentración de sólidos totales, mayor contenido de nutrientes habrá en el biol generado (Botero & Preston, 1987).

Análisis de eficiencia del digestor.

DQO. La DQO, siendo un indicador de contaminación mide la cantidad de oxígenos necesario para oxidar la materia orgánica degradable, así como también restos de materiales fibrosos, ligninas, entre otros (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008); disminuyó en 71,20.

DBO₅. Este parámetro mide el potencial contaminante de las aguas residuales, la reducción fue de 82,25%, porcentaje de remoción que se encuentra dentro del rango (70-90%), que según Gonzáles & Sandoval (2005) debe presentarse luego de un digestión anaerobia.

Como resultado se pudo obtener que el sistema sea eficiente, pues en el caso de la DQO logró reducir un 71,20% y en el caso de la DBO₅ hubo una reducción del 82,25%.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.

Planteamiento de la hipótesis.

$H_0: E = 50$ (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, bajo condiciones psicofílicas, se produce 50 Litros de gas metano diarios).

$H_1: E > 50$ (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, bajo condiciones psicofílicas, se produce más de 50 Litros de gas metano diarios).

Intervalo de confianza para la media.

Los estimadores puntuales para la media y la desviación estándar son:

$$\frac{\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Suponiendo distribución normal, el intervalo al 95% de confianza para la μ está dado por:

2

$$\left[\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right] = \left[54,64 - 1,96 \frac{22,52}{\sqrt{63}}, 54,64 + 1,96 \frac{22,52}{\sqrt{63}} \right] = [49,08; 60,20]$$

Con una confianza del 95% se espera que la producción promedio de gas metano este entre 49,08 y 60,20 Litros.

² Z: críticos de la distribución normal para = 0,05 con dos colas 1,96.

Estadístico de prueba.

Para probar la hipótesis se calculó el estadístico de prueba:

$$\frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Z calculado < Z de la tabla

$$1,63 < 1,96$$

Por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

$H_0: E = 50$ (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, se produce 50 Litros de gas metano).

Esto se verifica en las tablas mostradas anteriormente, el volumen de gas se encuentra dentro del rango esperado, ya que el sistema operó en condiciones psicofílicas, coincidiendo así con los resultados de Alvarez, Villca, & Liden (2006).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

La correcta disposición de excretas bovinas se ha convertido en uno de los factores más limitantes en los procesos de producción animal en ganaderías de leche, por los volúmenes de producción de materia fecal durante el proceso de ordeño en el establo que ocasiona grandes problemas de contaminación ambiental.

La Finca "Rancho Santa Esther" cuenta con 98 animales de los cuales, 36 son vacas lecheras que ingresan al ordeño dos veces por día, generando en promedio 21,9 kg de excretas; debido a que el ordeño se realiza en un espacio relativamente reducido genera una considerable cantidad de residuos sólidos y

líquidos de alto poder contaminante; en donde la construcción de un digestor anaerobio de flujo continuo, se presenta como una solución a esta problemática.

El análisis de estiércol realizado al inicio mostró una alta humedad, un bajo contenido de sólidos, DBO, DQO, nitrógeno y fósforo dentro de los rangos establecidos por bibliografía, en el caso del carbono estuvo fuera de rango, lo que obligo a realizar una dilución para mantener una C/N apropiada; las UFC's de coliformes totales y fecales se mostraron fuera de rango.

El haber escogido un tanque digestor de 1000 Litros resultó conveniente para la cantidad de excretas recolectadas. Que el régimen haya sido continuo no fue lo más acertado ya que la gran cantidad de materia orgánica que ingresaba a diario conllevó a tener fermentación ácida.

El haber utilizado aislante térmico e invernadero fue decisivo para una buena activación de las bacterias anaerobias.

La excesiva carga orgánica hizo que los ácidos grasos volátiles y el CO₂ se acumularan, creando una fermentación acidogénica, lo que hizo que el pH se mantuviera en promedio 6,21.

El digestor trabajó la mayor parte del tiempo bajo condiciones psicrófilas, es decir que las bajas temperaturas determinaron la operación del equipo, haciendo lento el proceso de estabilización (38 días) y afectando la generación de gas; el uso de invernadero apresuró el metabolismo bacteriano, sin embargo creó grandes choques térmicos día-noche, mitigados por el aislante térmico.

Durante 107 días de monitoreo, se obtuvo un promedio de 54,64 L/día o 0,05 m³/día de biogás; con un porcentaje mayor al 45% de metano y un promedio de 38,40% de dióxido de carbono.

El análisis estadístico de datos, confirmó que la producción de gas metano se encontraba dentro de los rangos esperados, produciéndose en promedio 50 Litros/día.

Diariamente se obtuvo 13 Litros de biol; que comparados con las excretas, presentó un pH que se mantuvo en el rango neutro; una reducción de 59,49% de sólidos totales, 67,7% de sólidos volátiles, 31,31% de sólidos fijos, 99,95% de materia orgánica, 91,11% de nitrógeno, 60,17% de fósforo; finalmente una reducción del 71,20% de DQO y 82,25% de DBO₅.

En relación a los coliformes hubo una importante reducción de UFC's, sin embargo no se llegó a cero, por lo que el olor fétido de las excretas también se redujo casi en su totalidad.

RECOMENDACIONES.

Implementar un sistema de calentamiento de excretas que no consuma gas, para disminuir tiempos de retención.

Planificar de una mejor manera la recolección de excretas, a fin de que no se desperdicie y con ello ser capaces de generar mayor cantidad de gas.

Estudiar más a fondo digestores que trabajen a temperaturas bajas, con el objetivo mejorar el diseño de sistemas anaerobios.

Realizar un estudio reológico del sustrato para diseñar un sistema de agitación y mejorar la eficiencia en la producción de gas.

Medir las propiedades nutricionales de los abonos orgánicos que se producen en el digestor y probar alternativas de post-tratamiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, N. (2011). Diseño, Construcción Y Operación de un Digestor Anaerobio Piloto Para Tratamiento de Residuos Sólidos

Orgánicos del ZOOLOGICO DE QUITO.
ESPE. Ecuador.

- Alvarez, R., Villca, S., & Liden, G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude, Biomass and Bioenergy. Barcelona.

- Bavera, G., & Peñafort, C. (2006). Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación. Argentina.

- CEDECAP-GREEN EMPOWERMENT. (Mayo de 2009). Taller de intercambio de experiencias de biodigestores en América Latina. Lima. Perú.

- FAO. (1992). Biogas processes for sustainable development Agricultural Services Bulletin No 95. Roma.

- López, G. (1992). Digestión anaerobia de residuos orgánicos urbanos. Universidad Distrital FJC. Colombia.

- Agroecuador. (2011). Población vacuna en el Ecuador. Recuperado el 16 de Febrero de 2012, de http://www.agroecuador.com/HTML/Censo/censo_3111.htm

- INEC. (2002). Censo Nacional Agropecuario . Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www.inec.gob.ec>

- Instituto de metereología e hidrología. (Marzo de 2012). Pronostico del tiempo-Instituto de metereología e hidrología. Recuperado el 11 de Marzo de 2012, de <http://www.inamhi.gov.ec/html/inicio.htm>

- Instituto para una alternativa agraria. (2007). Manual de un biodigestor familiar tipo manga para zonas altas-andinas. Recuperado el 07 de Marzo de 2012, de http://grecdh.upc.edu/publicacions/manuals-tecnics/documents/m01_guia-de-instalacion-para-yachachiq.pdf