



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ADSORCIÓN DE METANO (CH_4) DE BIOGÁS MEDIANTE UN
FILTRO RELLENO DE UN SOPORTE CON CARBÓN ACTIVADO Y
PIEDRA PÓMEZ MOLIDA

AUTOR

Fabricio Alejandro Vélez Bowen

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ADSORCIÓN DE METANO (CH₄) DE BIOGÁS MEDIANTE UN FILTRO
RELLENO DE UN SOPORTE CON CARBÓN ACTIVADO Y PIEDRA PÓMEZ
MOLIDA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor Guía
MSc. Marco Vinicio Briceño León

Autor
Fabricio Alejandro Vélez Bowen

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Adsorción de metano (CH₄) de biogás mediante un filtro relleno de un soporte con carbón activado y piedra pómez molida, a través de reuniones periódicas con el estudiante Fabricio Alejandro Vélez Bowen, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Marco Vinicio Briceño León

Máster en Energías Renovables

CC: 1715967319

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado éste trabajo, Adsorción de metano (CH₄) de biogás mediante un filtro relleno de un soporte con carbón activado y piedra pómez molida, del estudiante Fabricio Alejandro Vélez Bowen, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Miguel Ángel Gualoto Oñate

Master of Science in Biology

CC: 1707429351

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

Fabricio Alejandro Vélez Bowen

CC: 1717462756

AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, que a lo largo de estos años han aportado en mi crecimiento profesional y personal. A MSc. Marco Briceño por su guía y valiosos aportes para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A mi familia ya que sin su apoyo y amor incondicional no habría sido posible lograr esta meta tan anhelada.

DEDICATORIA

A mis padres Shirley Bowen y Xavier Vélez, ya que la culminación de este trabajo representa el inmenso sacrificio que realizaron para que yo pueda terminar mis estudios, siendo ustedes mi motivación a cada paso. A mi hermano Xavier, por sus consejos y apoyo, brindándome no solo un familiar sino un amigo incondicional. A mi novia Vanessa, por acompañarme en los momentos difíciles, ensañándose a ser mejor cada día. A mis amigos, con quienes he compartido a lo largo de estos años, transformándose en parte importante de esta etapa profesional.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la efectividad de nueve filtros rellenos con carbón activado y piedra pómez molida, en diferentes proporciones para la adsorción de CH_4 . Los filtros fueron separados en dos grupos, el primero de 5 filtros con lechos de 160 ml y proporciones de materiales de 100%CA, 75%CA-25%PP, 50%CA-50%PP, 25%CA-75%PP y 100%PP, el segundo grupo de 4 filtros con lechos de 100 ml y composiciones de 100%CA, 75%CA-25%PP, 50%CA-50%PP y 25%CA-75%PP. Todos los filtros fueron evaluados en condiciones de laboratorio. Las unidades experimentales constaron de: un biodigestor, donde se generó el biogás, un sistema de lavado, para separar el CO_2 y un filtro, en el que se retuvieron componentes menores de la mezcla gaseosa. Los resultados obtenidos, muestran que, los filtros con mayor cantidad de carbón activado son los más eficientes. De igual forma; se evidenció que la piedra pómez molida, facilita el proceso de adsorción del metano dentro de los filtros ya que retiene la humedad. El mejor filtro, con un lecho de 160 ml y un contenido de 100% carbón activado, presentó una eficiencia de 76.1%, mientras que el menos eficiente, fue el filtro con un lecho de 100 ml compuesto de 25% carbón activado y 75% piedra pómez con una eficiencia del 9%. Para evidenciar la viabilidad de empleo de estos filtros en condiciones y escala reales, se realizó un análisis costo-beneficio, los resultados muestran que su costo es sustentable; razón por la que pueden ser implementados en la industria ecuatoriana, por sus beneficios ambientales, como parte de las políticas ambientales institucionales y de producción limpia.

ABSTRACT

In the present study, was evaluated the effectiveness of nine filters filled with activated carbon and ground pumice stone in different proportions for the adsorption of CH₄. The filters were separated into two groups, the first one of 5 filters with 160 ml beds and material proportions of 100% CA, 75% CA-25% PP, 50% CA-50% PP, 25% CA-75% PP and 100% PP, the second group of 4 filters with 100 ml beds and compositions of 100% CA, 75% CA-25% PP, 50% CA-50% PP and 25% CA-75% PP. All filters were evaluated under laboratory conditions. The experimental units consisted of: a biodigester, where the biogas was generated, a washing system to separate the CO₂ and a filter, in which minor components of the gas mixture were retained. The results obtained, show that, the filters with the highest amount of activated carbon are the most efficient. The same way; it was evidenced that the ground pumice stone, facilitates the process of adsorption of methane inside the filters since it retains moisture. The best filter, with 160ml and a content of 100% activated carbon, showed an efficiency of 76.1%, while the least efficient was, the filter with a 100 ml composed of 25% activated carbon and 75% pumice stone with an efficiency of 9%. To demonstrate the feasibility of using these filters under real conditions and scale, a cost-benefit analysis was carried out, the results show that their cost is sustainable; reason why the filters can be implemented in the Ecuadorian industry, for its environmental benefits, as part of the institutional environmental policies and clean production.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes:.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance:	2
1.4. Justificación:	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Carbón activado y piedra pómez	5
2.2. Sistemas de tratamiento de gas.....	7
2.2.1. Filtros de gas	8
2.3. Biogás	9
2.3.1. Digestión anaeróbica.....	10
2.3.2. Usos del biogás y sus beneficios.....	11
2.3.3. El Metano	12
2.4. Adsorción.....	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Área de estudio.....	14
3.2. Elaboración de los biodigestores	15
3.2.1. Recolección de material para la generación del biogás.....	15
3.2.2. Determinación de sólidos totales y volátiles del estiércol	15
3.2.3. Construcción de los biodigestores para generar biogás	17
3.3. Construcción e instalación de los sistemas de captación	18
3.4. Medición de los rendimientos de CH ₄ iniciales.....	20
3.4.1. Cálculos para obtener el rendimiento de CH ₄	20
3.5. Diseño y construcción de los filtros	21

3.5.1.	Cálculos de las dimensiones.....	21
3.5.2.	Cálculos del lecho	22
3.5.3.	Construcción de los filtros	23
3.6.	Determinación de rendimiento de CH ₄ después del filtro ..	24
4.	RESULTADOS	27
4.1.	Calculo de volumen de los tramos.....	27
4.2.	Volúmenes de metano iniciales y rendimientos de CH ₄	28
4.3.	Volúmenes de metano finales (después del filtro).....	30
4.4.	Volumen de CH ₄ y porcentaje de retención de los filtros ...	31
4.5.	Volúmenes de CH ₄ a condiciones normales antes y después de pasar por los filtros	32
4.6.	Figuras de los resultados obtenidos en la fase experimental.....	34
4.	DISCUSIÓN	36
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
5.1.	Conclusiones	44
5.2.	Recomendaciones.....	45
	REFERENCIAS	47
	ANEXOS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Micrografía de microestructura del carbón activado.....	6
Figura 2. Fotografía de piedra pómez con estructura de alta porosidad.	7
Figura 3. Características generales del biogás.	10
Figura 4. Biodigestores, sustrato de origen bovino.	11
Figura 5. Generación estimada de biogás y abono del estiércol de bovino. ..	12
Figura 6. Esquema del biodigestor para generar biogás.....	18
Figura 7. Esquema del sistema completo (fase experimental).	19
Figura 8. Esquema para la medición del volumen de metano antes del los filtros.....	20
Figura 9. Filtros rellenos de carbón activado y piedra pómez molida.....	24
Figura 10. Esquema para la medición de los volúmenes de metano (CH ₄) tratado por el filtro.....	25
Figura 11. Volúmen de CH ₄ en el tiempo después de los filtros de 160 ml, (captados en la segunda probeta)	34
Figura 12. Volúmen de CH ₄ , obtenido a lo largo del tiempo después de los filtros de 100 ml.	35
Figura 13. Volúmen de metano retenido en todos los filtros a condiciones normales.....	35
Figura 14. Porcentaje de metano retenido de cada uno de los filtros a condiciones normales.....	36
Figura 15. Funcionamiento de un filtro de carbón activo en el tiempo plt 3	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales propiedades físico químicas del metano	13
Tabla 2. Diseño experimental para evaluar la adsorción de metano	26
Tabla 3. Datos de los volúmenes iniciales de metano (pre filtro)	28
Tabla 4. Rendimiento de metano en las unidades experimentales (pre filtro).....	30
Tabla 5. Resultados de la medición de volúmenes finales (después del filtro).....	30
Tabla 6. Resultados del cálculo del porcentaje de retención de CH ₄ en los filtros.....	32
Tabla 7. Volúmenes de metano CH ₄ transformado a condiciones normales antes y después de los filtros.....	33
Tabla 8. Costo por unidad de los filtros utilizados en el laboratorio y de los filtros a escala real	41

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes:

La contaminación atmosférica representa uno de los mayores problemas que la humanidad ha tenido que enfrentar a finales del siglo XX y principios del XXI (Thalasso, 2002). Sus efectos negativos pueden verse de manera local, regional y global, siendo las partículas suspendidas totales (PST), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el ozono (O₃) los principales contaminantes a nivel local, que afectan directamente la salud humana, mientras que; a nivel regional tenemos a los óxidos de nitrógeno (NOX) y de azufre (SOX) que provocan las lluvias ácidas, que dañan seriamente la infraestructura urbana y los ecosistemas, finalmente en el aspecto global, destacan contaminantes como los CFC que afectan seriamente la capa de ozono, el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) responsables del calentamiento global (Ballester Díez, 1999).

A partir de la revolución industrial, se incrementó sustancialmente el consumo de combustibles fósiles, al igual que las actividades agrícolas y otras actividades productivas de bienes y servicios, que conllevaron a un aumento exponencial de gases de efecto invernadero. Así, según estimaciones; en la actualidad se emiten 35 mil millones de toneladas de dióxido de carbono, 600 millones de toneladas de metano cada año. El metano, es 28 veces más potente en términos de calentamiento global que el CO₂ (Alier, 2004). Estimaciones publicadas por la EPA, señalan que cada estadounidense, es responsable de la emisión anual de más de 500 kg de NOX, COV, SOX y CO (Environmental Protection Agency, 1998).

La actividad ganadera es la de mayor importancia en la emisión de gases de efecto invernadero, la misma que aumenta en función de la demanda de alimentos por parte de la creciente población. La producción anual de metano se incrementa en 188 millones de toneladas por año, dióxido de carbono; 8.5 mil millones de toneladas por año (Carmona, 2005).

El control de las emisiones de metano, ha sido por muchos años una de las principales preocupaciones. No es factible eliminar las causas de su generación, sin embargo, se puede, reducir el volumen de las emisiones atmosféricas, empleando matrices porosas que lo conservan y permiten su utilización futura como fuente de carbono y energía para microorganismos especializados, que lo metabolizan a CO₂. (Varnero, 2012).

Existen varias tecnologías que permiten el control y reducción de emisiones atmosféricas de metano, de carácter fisicoquímico y biológico, su elección depende de: El tipo de industria que lo genera, volumen, presencia de mezclas y subproductos asociados generados (Ramírez, 2006).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Evaluar la efectividad de un filtro con carbón activado y piedra pómez molida para la adsorción de CH₄.

1.2.2. Objetivos específicos.

- I. Diseñar un filtro destinado a la adsorción de metano CH₄ de biogás.
- II. Construir un filtro relleno de un soporte con carbón activado y piedra pómez molida que permita la experimentación en el laboratorio.
- III. Realizar un análisis comparativo entre la cantidad de CH₄ del biogás pre filtro y la cantidad de CH₄ post filtro.

1.3. Alcance:

El presente proyecto se centra en determinar la capacidad de adsorción de metano (CH₄) del biogás, utilizando un filtro relleno con piedra pómez molida y

carbón activado, que adsorberá al metano, reduciendo su cantidad en el biogás, durante una fase experimental de 40 días. Para el efecto, se realizará un análisis comparativo de la cantidad de CH₄ antes y después del paso por el filtro. El filtro será destinado a la mitigación de emisiones de metano, en fuentes como: Combustible fósil (Carbón, petróleo y gas), Vertederos y actividades agrícola (estiércol).

1.4. Justificación:

En 2006 la FAO dio a conocer un estudio titulado “La larga sombra del ganado” en el que se afirmaba que el sector ganadero genera más CH₄ en medidas equivalentes de CO₂, que el sector transporte (18%). El Worldwatch Institute (organización ecologista con sede en Washington) por su parte, publicó un informe en diciembre de 2009 bajo el título de “Ganadería y cambio climático”; donde critica el informe de la FAO porque - según ellos- se “queda corto” en sus evaluaciones, llegando a asegurar que la ganadería emite más de la mitad de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (51%), siendo el metano gran parte de dicho resultado (Guyer, 2011).

En Ecuador, Quito y Santo Domingo de los Tsáchilas registraron los niveles más altos de contaminación de PM_{2.5} (33ug/m³) y COVs según la Organización Mundial de la Salud (2014). El caso de Santo Domingo de los Tsáchilas se debe a que, es ruta de circulación de un nutrido número de vehículos de combustión interna, entre la Sierra y la Costa, quienes generan ingentes cantidades de hollín negro que se impregna en las paredes de las casas y locales comerciales de la zona (Alejandrina, 2012).

Según el Municipio de Santo Domingo, los coches son la fuente principal de polución. Son dos los factores que inciden sobre esta situación; la falta de un control adecuado del estado operativo de los automóviles y la mala calidad del combustible que no cumple con parámetros internacionales. En la actualidad se señala que con respecto a los niveles internacionales de contaminación

promedio son Santo Domingo, Milagro, Quito, Latacunga, Manta y Portoviejo los que sobrepasan dichos niveles; mientras que Ibarra, Cuenca y Ambato son las ciudades menos polutas con respecto al CH_4 y PM. Por otro lado, con respecto a los límites nacionales de contaminación solo Quito, Santo Domingo y Milagro son las urbes con mayor problemática, a diferencia de la lista de ciudades polutas por niveles internacionales mencionada previamente (Garreaud, 2015).

Por lo tanto, se busca dar viabilidad a la implementación de un filtro para controlar y reducir la cantidad de CH_4 principalmente en las actividades ganaderas. Desde este punto de vista surge la importancia de este trabajo, ya que los resultados obtenidos buscan demostrar de manera técnica la eficiencia de filtros para adsorber metano derivado del biogás que es producido por estiércol bovino, el mismo que se ha transformado en una problemática ambiental para la industria ganadera en general. Además de lo ya mencionado, la implementación de los filtros es conveniente en el aspecto ambiental, ya que los materiales dentro del filtro serían los responsables de la adsorción de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos resultado de fuentes antropogénicas contaminantes como, combustibles fósiles, vertederos y actividad agrícola (Guerrero, 2013), los filtros adquieren estos compuestos del aire contaminado que pasa a través de los macroporos del material filtrante (Torres, 2012).

En el aspecto económico, los materiales dentro del filtro pueden en un futuro ser utilizados como fuente de carbono en el caso de los compuestos orgánicos y como fuente de energía para los compuestos inorgánicos, por ende el metano podría ser utilizadas por los ganaderos como una significativa fuente de ingresos, debido a su potencial energético (Torres Rodríguez, 2003), además, la posible aplicación de un filtro de este tipo puede tener repercusión favorable no solo en lo económico sino también en lo social, ya que si estos son viables la producción en masa creara nuevas plazas de trabajos en el país, lo cual derivara en la necesidad de realizar campañas de capacitación a los ganaderos y personas en general que utilicen los filtros, creando una interacción social enriquecedora para un beneficio mutuo, por último esto podría conllevar a inaugurar nuevas fases de

investigación referente a filtros para la industria (Universidad Autónoma de Nuevo León, 1997).

En el ámbito técnico, se puede estimar que un filtro para reducir las emisiones de CH₄ es viable, debido a que la instalación y los costos de construcción de filtros considerando materiales tales como; alúmina activada, sílice, carbón activado, zeolitas y piedra pómez, sería mucho menor a otros métodos filtrantes. Además, a diferencia de la técnica de filtración química la adsorción no realiza una transformación del metano ya que solo lo adhiere y almacena en el dispositivo, sumado a que la eficiencia de filtros por adsorción son mayores a los filtros químicos; Otra de las tecnologías más usadas son los filtros de aire electrostáticos los cuales requieren una fuente de energía externa, a pesar de que la eficiencia de dicha tecnología es elevada el diseño propuesto en este trabajo demuestra grandes ventajas tanto en el diseño como en los beneficios económicos y energéticos, ya que como se puede notar, la energía que podría brindar el CH₄ sería almacenada mas no consumida por el mismo filtro a diferencia del filtro electrostático que requiere energía para su función (Ortega Viera, 2015).

Por lo tanto, un filtro es una buena alternativa, debido a los significativos beneficios ambientales, técnicos, económicos y sociales que este tipo de tecnología puede brindar, lo que se traduce en la posibilidad de implementarlo en la industria del Ecuador de manera práctica y realista.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Carbón activado y piedra pómez

El carbón activado y la piedra pómez son conocidos como materiales altamente porosos, porque cuentan con grandes áreas superficiales, aunque dependiendo de la aplicación sus propiedades pueden cambiar (Bagreev, 2004). Tanto el carbón activado como la piedra pómez son empleados para desarrollar procesos

de adsorción que pueden ser químicos o físicos, esto depende del tipo de fuerzas intermoleculares que intervienen en la superficie del sólido y el compuesto que será adsorbido, en este caso dicho compuesto es el metano (adsorbato). Las propiedades adsorbentes de estos materiales se basan también en su naturaleza química, tal como ocurre con el carbón activado que tiene una estructura de átomos de carbono con valencia insaturada (Universidad Nacional de Colombia, 2013).

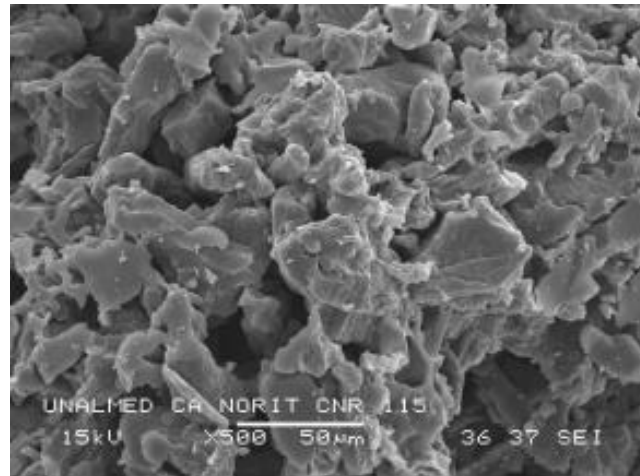


Figura 1. Micrografía de microestructura del carbón activado. Tomado de (Universidad Nacional de Colombia, 2016).

Por otro lado, la piedra pómez presenta una composición química conformada principalmente de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, siendo el sílice uno de los materiales más usados para la adsorción por su gran superficie efectiva, además la piedra pómez presenta excelentes propiedades hidrofílicas por lo que es capaz de retener humedad. Todos estos factores aportan de manera favorable un efecto relevante en los procesos de adsorción (Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato, 2018).



Figura 2. Fotografía de piedra pómez con estructura de alta porosidad.
Tomado de (Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato, 2018)

En conclusión, el carbón activado y la piedra pómez molida son productos versátiles, por ende, cuentan con numerosas aplicaciones a nivel industrial y artesanal (Biloé, 2002), siendo la purificación del aire y el almacenamiento de gases uno de sus usos más prometedores (Shim, 2006). Las principales tecnologías que han obtenido grandes avances en los últimos 50 años son; filtros de aire mecánicos de los cuales derivan dos grandes categorías, filtros con lecho de fibras finas y filtros con lecho de fibras espesas, también hay filtros químicos y filtros de aire electrostáticos; todos estos pueden ser destinados a la adsorción en fase líquida y gaseosa (Wang, 2010).

2.2. Sistemas de tratamiento de gas

Entre los principales sistemas de tratamiento de gases podemos nombrar; Lavadores vía química, Adsorción por matrices de gran área efectiva y Biofiltración del cual pueden derivar varias técnicas, dos de las más eficientes son el Biotrickling y Bioscrubbers los cuales basan su funcionamiento en el uso de bacterias especializadas para degradar compuestos contaminantes y eliminar malos olores (Castells, 2012).

Los sistemas de tratamiento de gas como filtros con rellenos naturales, son considerados como tecnologías limpias o verdes que presentan una serie de

ventajas comunes, entre las que destacan: su capacidad para retener y degradar los contaminantes a otros productos inocuos o menos contaminantes, bajo temperatura y presión ambientales, presentan además, costos de inversión moderados, costos de operación relativamente bajos, elevado volumen de gases que se puede tratar con bajas concentraciones de los compuestos contaminantes y altos rendimientos de degradación en el tratamiento de un elevado número de contaminantes atmosféricos, pudiéndose tratar de forma efectiva mezclas de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos con un bajo requerimiento energético en el equipamiento (Zapata, 2004).

Los materiales usados comúnmente como soportes son: polímeros, cerámicas, zeolita, carbón activo o mezclas de varios materiales (Cohen, 2001). La filtración es una de las tecnologías más económicas para el tratamiento eficiente de grandes flujos de aire poco contaminados. Los costos varían para cada tratamiento, pero este puede oscilar entre 0.3 y 2.5 dólares americanos por 1000 m³ tratados, Valores que son de 3 a 10 veces más baratos en comparación con las tecnologías de tratamiento de tipo químico (incineración, uso de químicos, etc.) (Sosa Hernández, 2014).

2.2.1. Filtros de gas

Los filtros de gas son dispositivos diseñados para el tratamiento de gases corrosivos, tóxicos o nocivos, los cuales puede ser tratados mediante procesos físicos de transferencia de materia o reacciones químicas y biológicas (Rojano, 2016). Los filtros cuentan con diferentes aplicaciones tales como; eliminación de olores y COV's, filtración de polvo, separación de aerosoles, ventilación industrial y piping. Varias de las características relevantes de estos dispositivos son; la versatilidad para poder tratar compuestos inorgánicos u orgánicos, capacidad de tratar grandes volúmenes de gases contaminados, costos de fabricación y mantenimiento moderados, variada aplicación a sectores industriales y dependiendo de al ámbito de aplicación los filtros de gases cuentan con una eficiencias que oscila entre el 65% al 93% (Gallego Piñol, 2013).

Por ende, es posible dar viabilidad a la implementación de un filtro para controlar y reducir el contenido de metano de biogás que se libera a la atmosfera. Los compuestos como el carbón activado y la piedra pómez pueden ser responsables de la adsorción de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos (Guerrero, 2013), toman estos compuestos del aire contaminado que pasa a través de los macroporos del material filtrante (Torres, 2012), además estos materiales pueden en un futuro ser aprovechados como fuente de energía para los compuestos orgánicos e inorgánicos que son tratados, esto implica en dicho caso un aumento de la biomasa y estimula la oxidación por respiración endógena traducido en la degradación de los contaminantes en compuestos no peligrosos para el ambiente (Universidad Autónoma de Nuevo León, 1997).

Los filtros tipo empaque tienen una aplicación en almacenamiento de gas natural vehicular, utilizando el método ANG (gas natural adsorbido, por sus siglas en inglés) (Wang, 2010), este método es un sistema liviano, seguro y de bajo consumo energético comparado a otros métodos lo cual se traduce en un futuro desarrollo de combustible menos contaminante aplicable a vehículos y con menores costos (Linares-Solano, 2008).

2.3. Biogás

Es un gas combustible producido por la acción de diferentes microorganismos (bacterias metanogénicas, entre otros), a partir de la descomposición de materia orgánica (biomasa) utilizando reacciones de biodegradación, este se produce en ausencia de oxígeno. Algunas de las principales fuentes de biomasa para la generación de biogás son; estiércoles, lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, residuos de rellenos sanitarios, restos de actividad agrícola o pecuaria y residuos sólidos urbanos (Redagrícola, 2017). El biogás es considerado un producto del cual puede derivarse varios usos potenciales para la industria (generador de electricidad, productor de calor, combustible, etcétera), principalmente por su elevado contenido energético (Hernández, 2017), este

último y otras propiedades del biogás pueden verse a continuación en la Figura 3.

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Figura 3. Características generales del biogás.

Tomado de (Moreno, 2011).

2.3.1. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso de naturaleza biológica en ausencia de oxígeno, que parte de materiales orgánicos obtenidos principalmente de residuos vegetales y animales, este proceso genera biogás, que es básicamente una mezcla de metano y dióxido de carbono sumado a otros compuestos como; nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Además, los microorganismos que intervienen en el proceso pueden convertir residuos de varios tipos de orígenes en productos útiles, tales como el metano. La figura 4 muestra biodigestores que permiten la obtención de biogás utilizando el proceso que se explicó previamente (Moreno, 2011).



Figura 4. Biodigestores, sustrato de origen bovino.

Tomado de (Mesquida, 2019).

2.3.2. Usos del biogás y sus beneficios

Tanto el biogás como el gas natural, cuentan con una amplia variedad de usos, con la gran diferencia que el biogás representa una fuente de energía renovable ya que este es derivado de la biomasa (Hernández, 2017).

El biogás tiene una gran variedad de usos entre los más relevantes están; productor de calor en calderas, combustible de turbinas que generan electricidad, refinado puede reemplazar al gas natural y ser utilizado en automotores y base para la síntesis de metanol. El biogás cuenta con un valor energético relevante, en términos generales un m^3 equivale a 2.4 kW-hora de electricidad, 0.7 litros de gasolina, 0.6 m^3 de gas natural o 1,3 kg de madera. En la Figura 5, el estudio realizado por Varnero (2012) demuestra que si se procesan los desechos de 10 bovinos podrían generar lo equivalente a 4 balones de gas licuado y otorgar abono para fertilizar 300 m^2 de superficie cultivable.

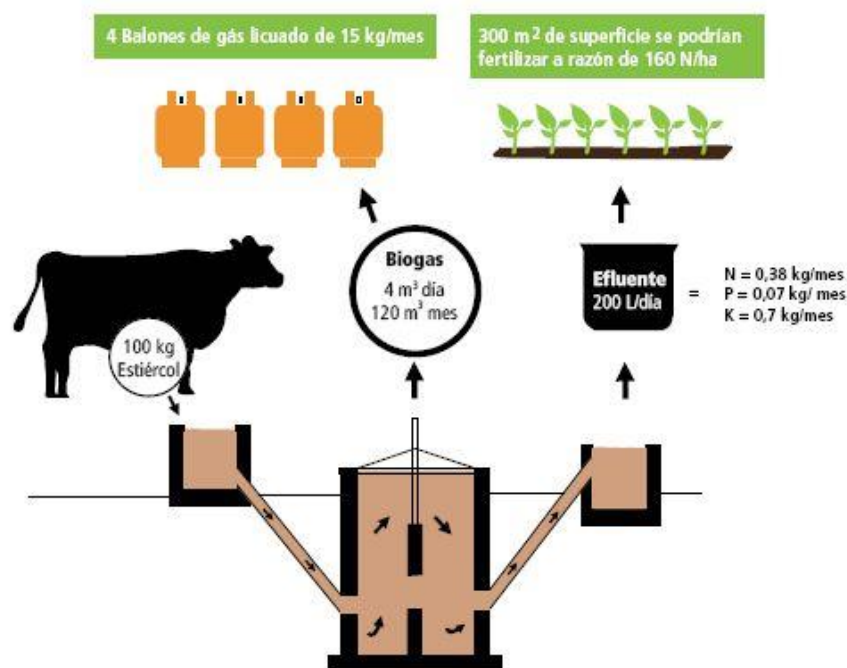


Figura 5. Generación estimada de biogás y abono del estiércol bovino.

Tomado de (Varnero, 2012).

Tras el acuerdo de París de 2015, las energías renovables han crecido en impulso y respaldo, ya que este generó un compromiso a reducir las emisiones contaminantes por parte de todos los países firmantes. Por lo tanto, cada vez es más imperante el uso fuentes de energía renovable que a diferencia de los combustibles fósiles estos no generan gases de efecto invernadero. Por otro lado, los costes de las energías renovables, como el biogás, son cada vez menores debido al desarrollo tecnológico de los últimos años, dándole una ventaja fundamental sobre los combustibles fósiles los cuales muestran aumentos de presión continuo (Repositorio de la Universidad Federal de Santa Catarina, 2008).

2.3.3. El Metano

Es una sustancia incolora no polar, de los hidrocarburos saturados el metano es el que tiene la cadena más corta, su fórmula química es CH₄, en la que enlaces covalentes unen un átomo de carbono a 4 átomos de hidrogeno, además se

caracteriza por su baja solubilidad en fase líquida; en la Tabla 1 se puede apreciar varias de sus propiedades fisicoquímicas. En la actualidad el metano es el causante de más del 20% del efecto invernadero antropogénico, mientras que sus fuentes principales son del cultivo de arroz y la ganadería correspondiente al 30 y 50 % respectivamente como fuente de metano de origen humano, mientras que focos de origen natural destacan; pantanos, descomposición de residuos orgánicos, defecación y digestión de animales, además, es un gas de efecto invernadero 21 veces más potente que el dióxido de carbono (Carmona, 2005).

Sin embargo, al mismo tiempo que el metano representa una seria amenaza para el ambiente este puede verse transformado en una fuente de energía renovable con ayuda del desarrollo de tecnología que permitan posicionarlo como un competidor rentable y viable frente a combustibles fósiles (Cornejo, 2010).

Tabla 1

Principales propiedades físico químicas del metano.

Propiedades físicas	Propiedades químicas
- Masa molecular: 16,04 g/mol	- Casi inerte debido a la elevada estabilidad de los enlaces C-H
- Punto de ebullición: -161° C	- Baja polaridad
- Punto de fusión: -183° C	- No se ve afectado por ácidos o bases fuertes
- Densidad relativa del gas (referencia; aire=1): 0.6	- No se afecta por oxidantes como el permanganato
- Temperatura de autoignición: 537° C	
- Solubilidad en agua (ml/100ml a 20° C): 3.3	

Adaptado de (Carmona, 2005).

2.4. Adsorción

La adsorción es básicamente el proceso en el cual una superficie retiene moléculas, átomos o iones de diferentes compuestos, es decir esto ocurre por la interacción entre la superficie de un sólido que es el adsorbente y la moléculas de un contaminante (adsorbato) (Cortés, 2009). En la medida que los poros de la superficie del sólido (adsorbentes) posean menos diámetro este será más propenso a provocar una mayor interacción con la partícula, lo que significa un aumento de los campos de fuerza de las paredes que ocasionaría un incremento del potencial de adsorción. Para estos procesos, resultan interesantes los materiales con una gran superficie interna y poco volumen, la adsorción en estos casos puede resultar tan efectiva que el proceso podría darse incluso en gases supercríticos (Repositorio de la Universidad de Alicante, 2001).

La adsorción se amplifica por un fenómeno llamado multicapas de adsorción, el cual consiste en que las primeras moléculas adsorbidas por el sólido es decir el adsorbente; pueden adsorber moléculas nuevas, lo que generaría una capa sobre el adsorbente, en este proceso participan fuerzas conocidas como fuerzas de Van der Waals o dipolares. Existen varios factores que afectan la adsorción tales como el ambiente en donde se realiza el proceso, de los cuales deriva temperatura, humedad y presión; además, de la superficie efectiva del adsorbente; la naturaleza y concentración de la sustancia adsorbida. La adsorción permite varias aplicaciones, entre las más destacadas están; la extracción de humedad de aire comprimido en actividades industriales, purificación de aguas residuales, eliminar olor, color y sabor de gases o soluciones contaminadas, obtención de nitrógeno, entre otros.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

La materia prima necesaria, para la ejecución de la investigación, fue obtenida en Machachi, que es cabecera cantonal del Cantón Mejía, se encuentra localizada al centro-norte de la Región interandina del Ecuador, ubicada a una altura de 2.945 msnm, con un clima andino promedio de 14°C. Las principales actividades económicas de la ciudad son: la producción de agua mineral, la agricultura, la ganadería y el transporte. La actividad ganadera, es una de las principales generadoras de biogás y de gases de efecto invernadero; como el metano y el dióxido de carbono (Repositorio de la Universidad Central del Ecuador, 2015).

3.2. Elaboración de los biodigestores

3.2.1. Recolección de material para la generación del biogás

El estiércol bovino, fue recogido, el domingo 10 de febrero del 2019, en un terreno de pastoreo para bovinos adultos a 10 minutos de la ciudad de Machachi, (el dueño del lugar dio acceso para el muestreo). Las coordenadas UTM del sitio son; zona 17S, 770880 este, 9945922, norte. Se recolectó aproximadamente 2 kg de estiércol bovino siguiendo una cadena de custodia sencilla, la cual está descrita en el Anexo 13, el estiércol fue colocado en fundas siploc, las mismas fueron etiquetadas y guardadas en un cooler para mantenerlas a baja temperatura de alrededor de 10°C procurando su conservación (Palencia, 2008). En total se realizaron 3 muestreos de 2 kg de estiércol, ya que en la primera visita la cantidad recolectada no fue suficiente.

3.2.2. Determinación de sólidos totales y volátiles del estiércol

Para realizar la determinación de sólidos totales y volátiles se utilizó el método 2540 G del Standard Methods para sólidos totales, fijos y volátiles en muestras sólidas y semi sólidas (Standard Methods, 2012). En menor medida se tomó en cuenta el Método 1684 de la EPA para sólidos totales, fijos y volátiles en sólidos y biosólidos (Environmental Protection Agency, 2011).

El estiércol fue primero pre tratado, retirando cualquier sustancia o material ajeno a su composición natural. Para determinar los sólidos totales, los crisoles se colocaron dentro de una estufa a 105 °C durante 1 hora, posterior de ese tiempo fueron colocados en un desecador durante 10 minutos, a continuación se pesaron y se colocó 25 g de estiércol en cada uno de estos. Los crisoles con la muestra fueron colocados en la estufa a 105 °C durante 16 horas, después fueron llevadas al desecador durante 10 minutos, finalmente fueron pesados. Se utilizó la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de solidos totales:

$$\% \text{ sólidos totales} = \frac{(A-B)*100}{C-B}$$

(Ecuación 1)

Donde:

A: peso de residuo seco + crisol.

B: peso del crisol.

C: peso de la muestra húmeda (estiércol sin secar) + crisol.

Para determinar los sólidos volátiles, se colocaron los crisoles del proceso anterior dentro de la mufla a 550 °C durante 4 horas, Posteriormente de ese tiempo se llevaron los crisoles al desecador durante 10 minutos para luego ser pesados. En la obtención del porcentaje de solidos volátiles se utilizó la siguiente formula (Environmental Protection Agency, 2011):

$$\% \text{ sólidos volátiles} = \frac{(A-D)*100}{A-B}$$

(Ecuación 2)

Donde:

A: peso de residuo seco + crisol.

B: peso del crisol.

C: peso del residuo + crisol después de la mufla.

La obtención de los ST y SV del estiércol son de importancia, ya que de estos cálculos se pudo realizar la construcción de los biodigestores, los mismos que

generan el biogás necesario para realizar la evaluación de los filtros y por ende el propósito de este estudio.

3.2.3. Construcción de los biodigestores para generar biogás

Para realizar el cálculo de las proporciones específicas de estiércol y agua destilada, de las unidades experimentales, se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Primeramente, se determinó la cantidad de solución estiércol- agua que se va a utilizar para los biodigestores, la cantidad ideal indicada por (Hernández, 2017) para experimentación en laboratorio va desde 200 ml a 500 ml, para efectos de este trabajo se determinó en 400 ml de solución.
- Se caracterizó el estiércol, determinando analíticamente los ST y SV.
- Por ultimo de debe determinar cuál será la cantidad de solidos totales que contendrá la solución de estiércol- agua destilada. Angelidaki (2009) en su estudio indica que el rango óptimo para los sólidos totales de soluciones generadoras de biogás esta entre 8% al 12%. Para efecto de este trabajo se determinó 9% de ST.

Con todos estos datos se logró calcular la cantidad de estiércol y agua destilada que se mezclaron, utilizando la siguiente formula (Angelidaki, 2009):

$$X = \frac{0.09 * CS}{ST}$$

(Ecuación 3)

Donde:

X: cantidad de estiércol húmedo en ml.

CS: cantidad a obtener de solución estiércol-agua destilada.

ST: solidos totales del estiércol.

0.09: solidos totales que debe contener la solución.

La cantidad de agua destilada necesaria se obtuvo, restando lo que se espera obtener de solución total (400 ml) del valor obtenido de la fórmula, CS - X.

Para el ensamblaje de los biodigestores se midió 240 ml de estiércol en un vaso de precipitación, seguido a ello se midió 160 ml de agua destilada mediante la utilización de una probeta. Tanto el sustrato (estiércol) como el inoculo (agua destilada) fueron mezclados en un vaso de precipitación hasta obtener una solución homogénea, a continuación se trasvasó la mezcla a un matraz de Erlenmeyer de 800 ml, el mismo que fue sellado con un tapón de silicona, en caso de ser necesario se hizo uso de algún sellantes extra como silicona caliente o parafilm. Inmediatamente se colocó haciendo presión una manguera a la conexión lateral del matraz, por donde saldrá el biogás, se reafirmó la conexión con parafilm para evitar la salida del biogás generado.

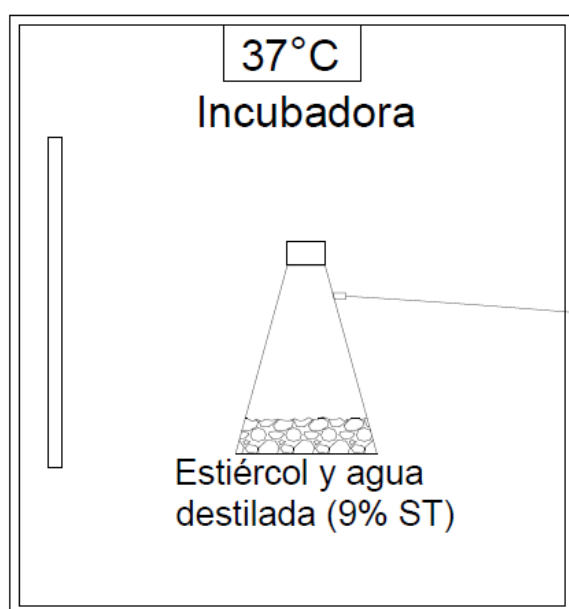


Figura 6. Esquema del biodigestor para generar biogás.

Finalmente, el matraz que contiene la solución, se incubó a 37°C, durante 15 días para almacenar un volumen de biogás adecuado para la siguiente etapa del sistema (Figura 6) (Mejía, 2012).

3.3. Construcción e instalación de los sistemas de captación

Los biodigestores dentro de la incubadora se conectaron mediante mangueras a frascos lavadores los cuales contienen 100 ml de solución de NaOH 2 molar, esto con el fin de que el biogás burbujee en la solución de NaOH y retener el CO₂ mediante una reacción de doble desplazamiento de la siguiente manera; ($\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), permitiendo así solo el paso del CH₄ y otros gases en volúmenes descartables (Izquierdo, 2004). Este frasco contiene un conducto de entrada conectado al biodigestor y otro de salida conectado a una probeta de 250 ml llena de agua destilada. Dentro de la probeta de 250 ml, se instaló otra manguera de poliuretano, conectada a un regulador de caudal, que regula el paso del gas metano, el regulador a su vez, está conectado a la entrada inferior del filtro. Por último, una manguera de poliuretano ubicada en la salida superior del filtro termina dentro de una nueva probeta de 100 ml llena de agua destilada.

Ambas probetas están sumergidas en un recipiente de plástico que contienen agua destilada, para mantener una misma presión y que el nivel de agua dentro de cada probeta sea solo alterado por el burbujeo de metano. Los filtros y las probetas fueron sostenidos por soportes universales, permitiendo que todo el sistema se mantenga estable. A continuación, se muestra un esquema del sistema completo.

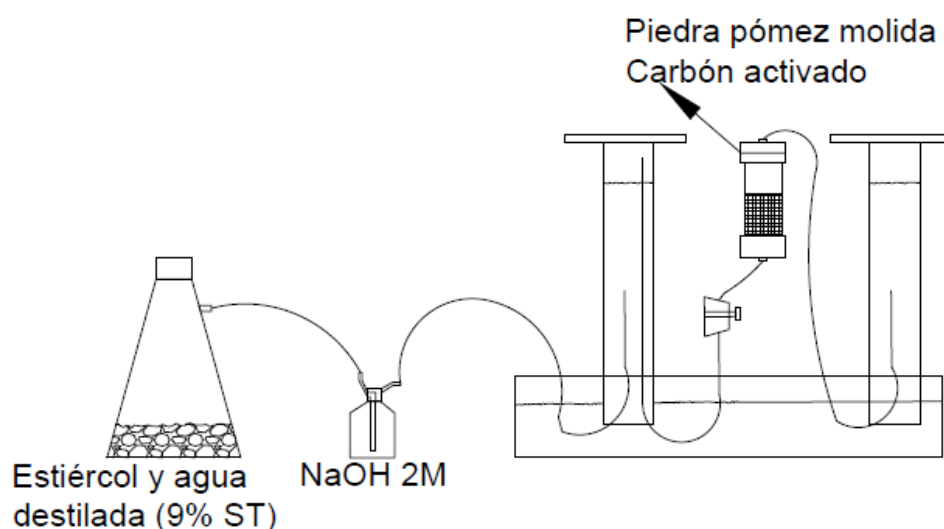


Figura 7. Esquema del sistema completo (fase experimental).

3.4. Medición de los rendimientos de CH₄ iniciales

La medición del volumen de metano producido, se inició a partir del 5to día de instalación de los biodigestores, a partir de ahí cada 48 horas. El desplazamiento de líquido en mililitros dentro de la probeta, fue considerado el volumen del gas producido. El regulador de caudal del sistema, se mantuvo cerrado en esta etapa (Figura 8) Con estas mediciones se determinó, si el volumen generado es suficiente para que continúe su paso al resto del sistema (Jiménez, 2006).

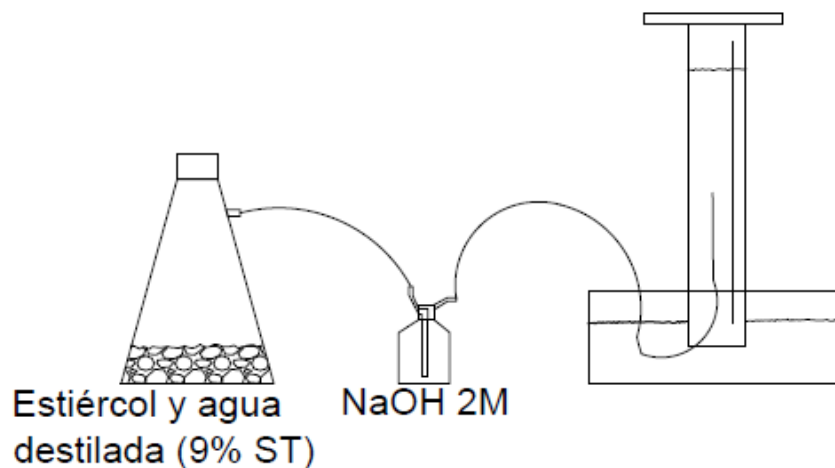


Figura 8. Esquema para la medición del volumen de metano antes de los filtros.

3.4.1. Cálculos para obtener el rendimiento de CH₄

Los cálculos de los rendimientos se realizaron determinando:

- Temperatura (laboratorio y condiciones normales)
- Presión (laboratorio y condiciones normales)
- Sólidos totales y volátiles del estiércol

Con todos los datos y utilizando la ecuación general de los gases $PV=nRT$. Se calcula el volumen de CH₄ a condiciones normales (Izquierdo, 2004):

$$V_0 = \frac{V * P * T_0}{P_0 * T}$$

(Ecuación 4)

A continuación, se calcula la concentración (rendimiento de metano) utilizando el volumen de CH₄ a condiciones normales y los SV determinamos previamente, utilizando la siguiente fórmula (Repositorio de la Universidad de Guayaquil, 2018):

$$\text{Rendimiento de CH}_4 = \frac{V_o \text{ CH}_4}{g \text{ SV}}$$

(Ecuación 5)

3.5. Diseño y construcción de los filtros

Los filtros fueron diseñados tomando en cuenta la Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración OPS/CEPIS/06.174 UNATSABAR (Organización Panamericana de la Salud, 2005) y el estudio sobre filtros de lecho poco profundo de (Ordeñada, 1996).

3.5.1. Cálculos de las dimensiones

La cámara de filtración es el elemento que contendrá el lecho filtrante, se recomienda que la razón largo / ancho sea de 3:1, y la altura mínima de la cámara debe ser el doble de la altura del lecho, además el material debe ser resistente a corrosión, oxidación, y flujos de gas contante (Organización Panamericana de la Salud, 2005). La altura mínima de lecho recomendado para flujos pequeños de gas varía de 5 cm a 8 cm (Ordeñada, 1996). Por lo tanto, se decidió utilizar un tubo de PVC ya que cumple con los requerimientos técnicos y económicos.

Para el cálculo se tomó en cuenta la altura de lecho mínimo y la razón largo / ancho, las dimensiones de la cámara de filtración se determinaron de la siguiente manera:

$$\frac{L}{A} = \frac{3}{1}$$

(Ecuación 6)

Donde:

L: Largo de la cámara de filtración

A: ancho de la cámara de filtración

Si L= 2 (Altura de lecho), y la altura de lecho máxima es de 8 cm (Ordeñada, 1996), se obtuvo que el largo de la cámara de filtración es de ≈ 16 cm, por lo tanto usando la Ecuación 6 se pudo calcular el ancho de la cámara;

$$A = \frac{16 \text{ cm}}{3}$$

$$A = 5.3 \text{ cm} = 2 \text{ pulgadas}$$

3.5.2. Cálculos del lecho

Para el presente estudio se utilizaron dos volúmenes de lecho los cuales se calcularon de la siguiente manera (Izquierdo, 2004):

$$V_a = L * (\pi * r^2)$$

(Ecuación 7)

Donde:

V_a: volumen aparente de lecho

L: altura de lecho

r: radio de la cámara de filtración (tuvo de PVC)

Para el lecho de altura de 5 cm:

$$V_1 = 5 \text{ cm} * (\pi * 2.5 \text{ cm}^2)$$

$$V_1 = 100 \text{ cm}^3$$

Para el lecho de altura de 8 cm:

$$V_1 = 8 \text{ cm} * (\pi * 2.5 \text{ cm}^2)$$

$$V_2=160 \text{ cm}^3$$

3.5.3. Construcción de los filtros

Con los cálculos de diseño, los filtros fueron construidos utilizando tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro, cada filtro con una longitud de 15 centímetros, en cada extremo un tapón tipo “hembra”, en la parte central de cada tapón se acopló una conexión para tubería tipo racor, que aseguró la hermeticidad del dispositivo. Por último, en la base interna de cada tapón se colocó una malla fina para evitar el escape del material que está dentro del filtro (lecho), dicho material está conformado por una mezcla homogénea de carbón activado y piedra pómez molida.

Se realizaron varias mezclas (%ca-%pp) a diferentes volúmenes previamente calculados; de 100 cm^3 (5 cm de lecho) y 160 cm^3 (8 cm de lecho) obteniendo así 9 diferentes filtros en total, las proporciones de mezclas para ambos volúmenes de lecho fueron explicadas más adelante en el diseño experimental (Ordeñada, 1996). Cada una de las partes del filtro fue sellada internamente con silicona fría y en la parte exterior con silicona caliente, todo con el fin de crear un filtro totalmente hermético evitando la fuga de metano (Figura 9).

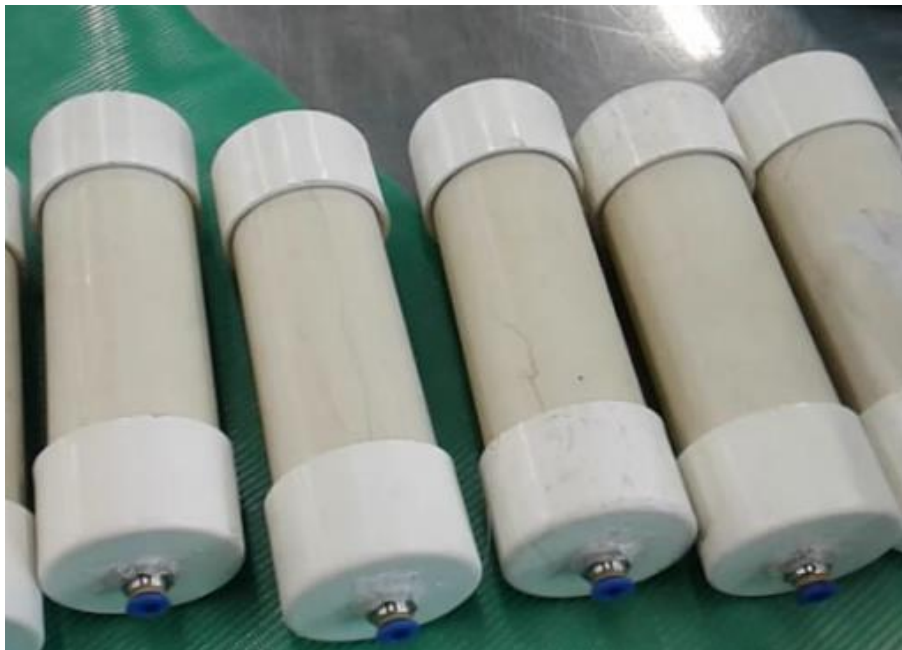


Figura 9. Filtros rellenos de carbón activado y piedra pómez molida.

3.6. Determinación de rendimiento de CH₄ después del filtro

Luego de conocidos el rendimiento inicial de CH₄ y determinar que el volumen de metano es el adecuado, se procedió a abrir totalmente el regulador de caudal, para permitir el paso de metano desde la probeta de 250 ml al filtro. Desde el momento que se abre el regulador se arranca el conteo con un cronometro, lo cual permitió registrar el volumen de metano durante el tiempo que pasa desde el filtro hasta la segunda probeta de 100 ml, el volumen de metano fue registrado cada 5 minutos hasta asegurarse de que el burbujeo sea nulo (Figura 10). Este procedimiento se repitió para todos los sistemas durante la fase experimental. (Múnera, 2017).

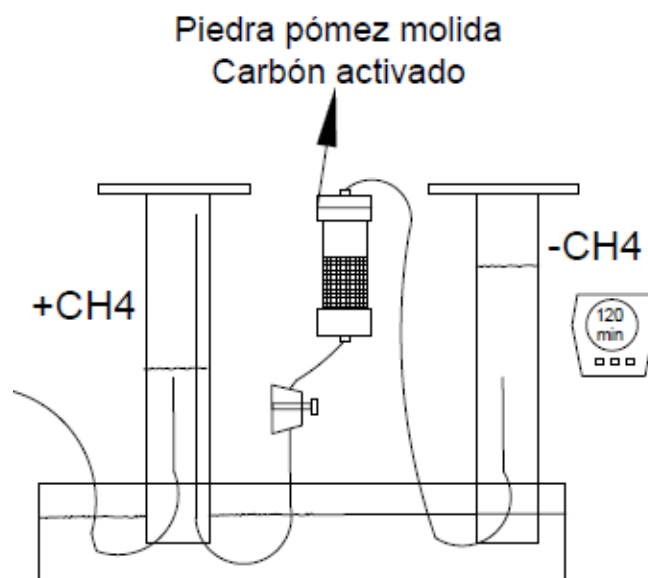


Figura 10. Esquema para la medición de los volúmenes de metano (CH_4) tratado por el filtro.

3.7. Diseño experimental

Con el propósito de conocer la real generación de metano y poder determinar adecuadamente los tiempos de experimentación y medición del gas. Se realizaron pre ensayos, construyendo 3 sistemas, pero sin la intervención del filtro.

En calidad de líquido de burbujeo, se emplearon tres variantes, agua-agua, NaOH-NaOH y agua-NaOH respectivamente, Las pruebas, demostraron que la variante agua-agua fue la mejor.

En total se construyeron 9 sistemas, cada uno consta de un biodigestor, un frasco lavador y un filtro que será evaluado. Las unidades experimentales se separaron en dos grupos, el primero consto de 5 filtros con volumen de lecho de 160 ml y composición de 100%CA, 75%CA-25%PP, 50%CA-50%PP, 25%CA-75%PP y 100%PP, el segundo grupo consto de 4 filtros con lechos de 100 ml y composiciones de 100%CA, 75%CA-25%PP, 50%CA-50%PP y 25%CA-75%PP.

La variable de respuesta es la adsorción de metano y el factor-tratamiento son los diferentes filtros (Ferré, 2002), véase en la Tabla 2.

Tabla 2

Diseño experimental para evaluar la adsorción de metano.

Adsorción de CH ₄		Tratamientos				
		100%CA	75%CA- 25%PP	50%CA- 50%PP	25%CA- 75%PP	100%PP
Bloques o grupos	Lecho de 100 ml	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄
	Lecho de 160 ml	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄	ml CH ₄

Para el análisis comparativo entre la cantidad de CH₄ del biogás antes del filtro y la cantidad de CH₄ después del filtro, se obtuvieron los volúmenes de metano iniciales es decir, los registrados en la primera probeta, el valor del último día de medición se restó del volumen que puede quedar atrapado en la tubería y dispositivos antes de llegar a la segunda probeta para poder obtener un valor real. Luego de que se realizó el proceso de medición después del filtro previamente explicado se obtuvo una serie de volúmenes a lo largo del tiempo, el valor final de dichas mediciones fue restado del valor real previamente obtenido en las mediciones antes del filtro, este resultado nos permitió realizar una regla de tres simple con lo cual se obtuvieron el porcentaje y volumen de retención final de cada filtro, todas estas mediciones y resultados fueron registrados en tablas con se muestra más adelante.

Se aplicó comparaciones entre las series de datos obtenidos después del filtro de los diferentes sistemas, buscando una perspectiva más visual. Estos gráficos sumados a los porcentajes y volúmenes de retención final de cada filtro permitieron analizar cuál fue el más eficiente. De esta manera se logró determinar la efectividad de los diferentes filtros al momento de adsorber metano.

4. RESULTADOS

4.1. Cálculo de volumen de los tramos

El cálculo de volumen de las mangueras conectadas desde la primera probeta al regulador de caudal, del regulador al filtro y del filtro a la segunda probeta se determinó de la siguiente manera:

$$V1 = \pi r1^2 * L$$

(Ecuación 8)

Donde:

V1: volumen total de las mangueras.

r1: radio interno de las mangueras

L: largo total de las mangueras

$$V1 = \pi 0.32\text{cm}^2 * (48.17\text{cm})$$

$$V1 = 15.49 \text{ cm}^3$$

El cálculo del volumen del espacio vacío que no ocupa el lecho dentro del filtro se realizó de la siguiente manera:

$$V2 = \pi r2^2 * L$$

(Ecuación 9)

Donde:

V1: volumen que no ocupa el lecho dentro del filtro.

r2: radio interno del filtro

L: altura del filtro menos la altura del lecho

Para filtro con lecho de 8 cm;

$$V2 = \pi 2.65\text{cm}^2 * (2.5\text{cm})$$

$$V1 = 55.1 \text{ cm}^3$$

Para filtro con lecho de 5 cm;

$$V2 = \pi \cdot 2.65 \text{ cm}^2 \cdot (5.07 \text{ cm})$$

$$V1 = 112 \text{ cm}^3$$

Para determinar el volumen total en donde puede quedar atrapado metano, se sumó los tramos previamente calculados.

$$V_t = V1 + V2$$

(Ecuación 10)

Para filtro con lecho de 8 cm;

$$V_t = 15.49 \text{ cm}^3 + 55.1 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 70.5 \text{ cm}^3$$

Para filtro con lecho de 5 cm;

$$V_t = 15.49 \text{ cm}^3 + 112 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 127.5 \text{ cm}^3$$

4.2. Volúmenes de metano iniciales y rendimientos de CH₄

En la Tabla 3, se muestra la generación de metano contenida en la primera probeta del sistema, la columna llamada "última medición" que se ve se refiere al volumen de metano adecuado para permitir su paso al resto del sistema. El valor real fue calculado restando del volumen de la última medición, el volumen total donde puede quedar atrapado metano, que se calculó en el numeral 4.1, dándose los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Datos de los volúmenes iniciales de metano (pre filtro)

Sistema	Última medición	Valor real (lecho 100ml)	Última medición	Valor real (lecho 160ml)
25CA-75PP	200 ml	72,5 ml	153,3 ml	82,8 ml
50CA-50PP	210 ml	82,5 ml	240 ml	169,5 ml
75CA-25PP	240 ml	112,5 ml	238 ml	167,5 ml

100% CA	260 ml	189,5 ml	242 ml	171,5 ml
100% PP	NA	NA	225 ml	154,5 ml

Los rendimientos de metano de cada sistema, en la primera probeta, se calcularon, considerando que los sólidos volátiles de la muestra de estiércol son de 12,7 g de la siguiente manera:

$$V_o = \frac{V * P * T_o}{P_o * T}$$

(Ecuación 4)

Donde:

V_o : volumen de metano a condiciones normales.

V : volumen de metano obtenido antes del filtro (primera probeta).

T_o : temperatura a condiciones normales.

P_o : presión a condiciones normales.

T : temperatura ambiente del laboratorio.

P : presión ambiente del laboratorio.

$$\text{Rendimiento de CH}_4 = \frac{V_o \text{ CH}_4}{g \text{ SV}}$$

(Ecuación 5)

Donde:

SV: sólidos volátiles del estiércol utilizado.

➤ **Filtro de 75CA-25PP (100ml):**

$$V_o = \frac{V * P * T_o}{P_o * T}$$

$$V_o \text{ inicial} = \frac{240 \text{ ml} * 1015 \text{ hPa} * 273,15 \text{ K}}{1013,25 \text{ hPa} * 287,15 \text{ K}} = 228,69 \text{ ml}$$

$$\text{Rendimiento de CH}_4 = \frac{V_o \text{ CH}_4}{g \text{ SV}}$$

$$\text{Rendimiento de CH}_4 = \frac{228,69 \text{ ml}}{12,7099 \text{ g SV}} = 17,99 \text{ ml/g}$$

De la misma manera que se ve en el ejemplo de cálculo, se generaron los resultados para el resto de filtros, que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Rendimiento de metano en las unidades experimentales (pre filtro).

Filtros	Vo inicial	Rendimiento de CH ₄
75CA-25PP (100ml)	228,69 ml	17,99 ml/g
50CA-50PP (100ml)	200,11 ml	15,17 ml/g
25CA-75PP (100ml)	190,58 ml	14,99 ml/g
100% CA (100ml)	249,73 ml	19,65 ml/g
75CA-25PP (160ml)	226 ml	17,78 ml/g
50CA-50PP (160ml)	227,89 ml	17,93 ml/g
25CA-75PP (160ml)	142,04 ml	11,17 ml/g
100% CA (160ml)	229,79 ml	18,07 ml/g
100% PP (160 ml)	216,12 ml	17 ml/g

Nota. Vo= volumen de CH₄ a condiciones normales (primera probeta); RendCH₄= rendimiento de metano, esta expresado en ml de CH₄ sobre gr de solidos volátiles del estiércol.

4.3. Volúmenes de metano finales (después del filtro)

Los volúmenes de metano se muestran en Tabla 5., estos valores fueron medidos, solo después de verificar la ausencia de burbujeo en el interior de la segunda probeta, que señala la ausencia de metano. En dicha tabla se incluyen también los datos del peso de lecho dentro de los filtros.

Tabla 5.

Resultados de la medición de volúmenes finales (después del filtro)

Sistema	Medición final (filtro 100ml)	PM	Medición final (filtro 160ml)	PM
25CA-75PP	66 ml	41,11 gr	54 ml	63,07 gr
50CA-50PP	64 ml	44,43 gr	62 ml	72,16 gr

75CA-25PP	51 ml	53,91 gr	50 ml	84,89 gr
100% CA	55 ml	80,34 gr	41 ml	88,27 gr
100% PP	NA	NA	96 ml	44,48 gr

Nota. PM= peso de mezcla dentro del filtro; Medición final= volumen de metano total que paso a la segunda probeta después del filtro de 100 y 160 ml; NA= no existe ese valor ya que la experimentación con 100%PP se realizó únicamente con un lecho de 160 ml.

4.4. Volumen de CH₄ y porcentaje de retención de los filtros

Los volúmenes de metano y el % de retención se muestran en la Tabla 6. Para su valoración se procedió de la siguiente manera:

$$R \text{ ml} = \text{Valor real} - \text{Medición final}$$

Donde:

R ml: retención de metano en mililitros.

Valor real: volumen de metano antes de pasar por el filtro.

Medición final: volumen de metano después de pasar por el filtro.

$$R\% = \frac{R \text{ ml} * 100\%}{\text{valor real}}$$

(Ecuación 11)

Donde:

R%: porcentaje de retención de metano

➤ Filtro de 75CA-25PP (100ml):

$$R \text{ ml} = \text{Valor real} - \text{Medición final}$$

$$R \text{ ml} = 107,2 \text{ ml} - 48,6 \text{ ml} = 58,6 \text{ ml}$$

$$R\% = \frac{R \text{ ml} * 100\%}{\text{valor real}}$$

$$R\% = \frac{61,5 \text{ ml} * 100\%}{112,5 \text{ ml}}$$

$$R\% = 54,67\%$$

Los cálculos generaron los siguientes resultados, que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.

Resultados del cálculo del porcentaje de retención de CH₄ en los filtros

Filtros	R ml	R %	Presión (hPa)	Temperatura (°C)
75CA-25PP (100ml)	58,6 ml	54,67%	1015	14
50CA-50PP (100ml)	17.6 ml	22,42%	1015	14
25CA-75PP (100ml)	6.2 ml	8,97%	1015	14
100% CA (100ml)	129,2 ml	70,98%	1016	12
75CA-25PP (160ml)	111,6 ml	70,15%	1015	15
50CA-50PP (160ml)	102,1 ml	63,42%	1015	15
25CA-75PP (160ml)	26,7 ml	34,78%	1011	21
100% CA (160ml)	123,9 ml	76,09%	1015	15
100% PP (160 ml)	56,2 ml	37,86%	1016	12

Nota. R%= porcentaje de retención; Rml= retención en ml. Las presiones y temperaturas de la tabla fueron medidas dentro del laboratorio en el momento de la medición.

4.5. Volúmenes de CH₄ a condiciones normales antes y después de pasar por los filtros

Para los cálculos se empleó la fórmula:

$$V_0 = \frac{V * P * T_0}{P_0 * T}$$

(Ecuación 5)

Donde:

V₀: volumen de metano a condiciones normales.

V: volumen de metano obtenido iniciales y finales.

T₀: temperatura a condiciones normales.

P₀: presión a condiciones normales.

T: temperatura ambiente del laboratorio.

P: presión ambiente del laboratorio.

➤ **Filtro de 75CA-25PP (100ml)**

Inicial:

$$V_0 = \frac{V * P * T_0}{P_0 * T}$$

$$V \text{ inicial} = \frac{112,5 \text{ ml} * 1015 \text{ hPa} * 273,15 \text{ K}}{1013,25 \text{ hPa} * 287,15 \text{ K}} = 107,2 \text{ ml}$$

Final:

$$V \text{ final} = \frac{51 \text{ ml} * 1015 \text{ hPa} * 273,15 \text{ K}}{1013,25 \text{ hPa} * 287,15 \text{ K}} = 48,6 \text{ ml}$$

Pariendo de este ejemplo, los resultados del cálculo se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.

Volúmenes de metano CH₄ transformado a condiciones normales, antes y después de los filtros.

Filtros	V inicial	V final
75CA-25PP (100ml)	107,2 ml	48,6 ml
50CA-50PP (100ml)	78,61 ml	60,98 ml
25CA-75PP (100ml)	69,08 ml	62,89 ml
100% CA (100ml)	182,02 ml	52,83 ml
75CA-25PP (160ml)	159,05 ml	47,48 ml
50CA-50PP (160ml)	160,95 ml	58,87 ml
25CA-75PP (160ml)	76,72 ml	50,03 ml
100% CA (160ml)	162,85 ml	38,93 ml
100% PP (160 ml)	148,4 ml	92,21 ml

Nota. V_{inicial} = volumen de CH_4 de la primera probeta restado los volúmenes que puede quedar atrapado en la tubería, filtro y dispositivos transformado a condiciones normales; V_{final} = volumen de CH_4 a condiciones normales de la segunda probeta (después del filtro).

4.6. Figuras de los resultados obtenidos en la fase experimental

Las Figuras 11 y 12 son obtenidas de la medición de metano durante el tiempo, que pasa desde el filtro hasta la segunda probeta de 100 ml, el volumen de metano fue registrado cada 5 minutos hasta asegurarse de que el burbujeo sea nulo. Los datos de estas mediciones se encuentran detallados en el anexo 1 y anexo 2.

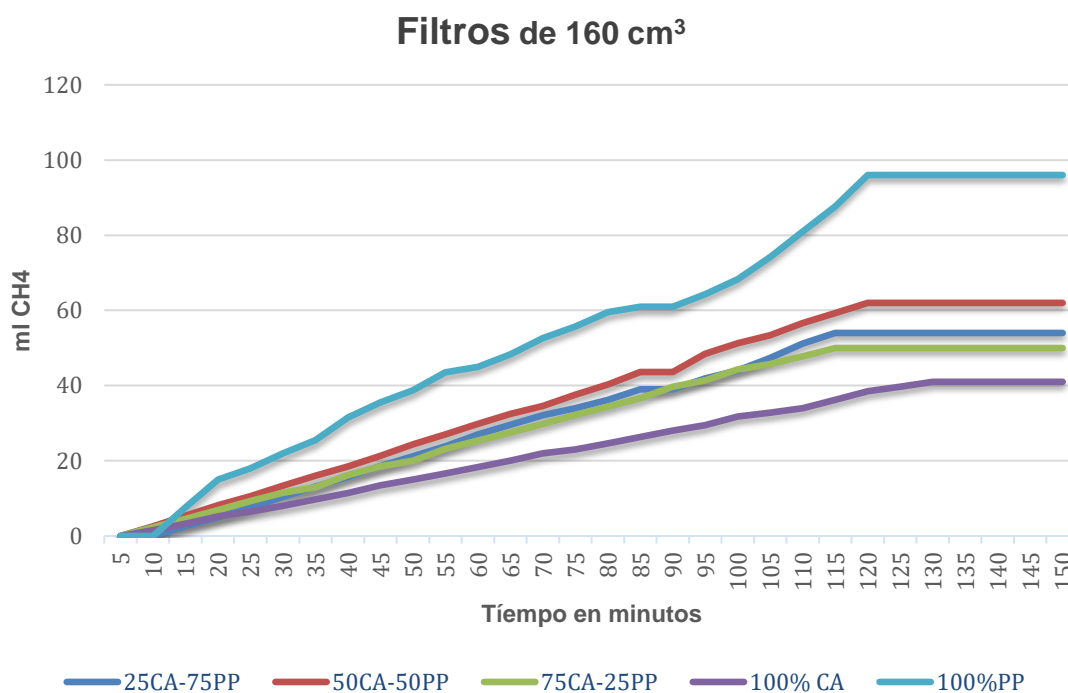


Figura 11. Volúmen de CH_4 en el tiempo después de los filtros de 160 ml, (captados en la segunda probeta).

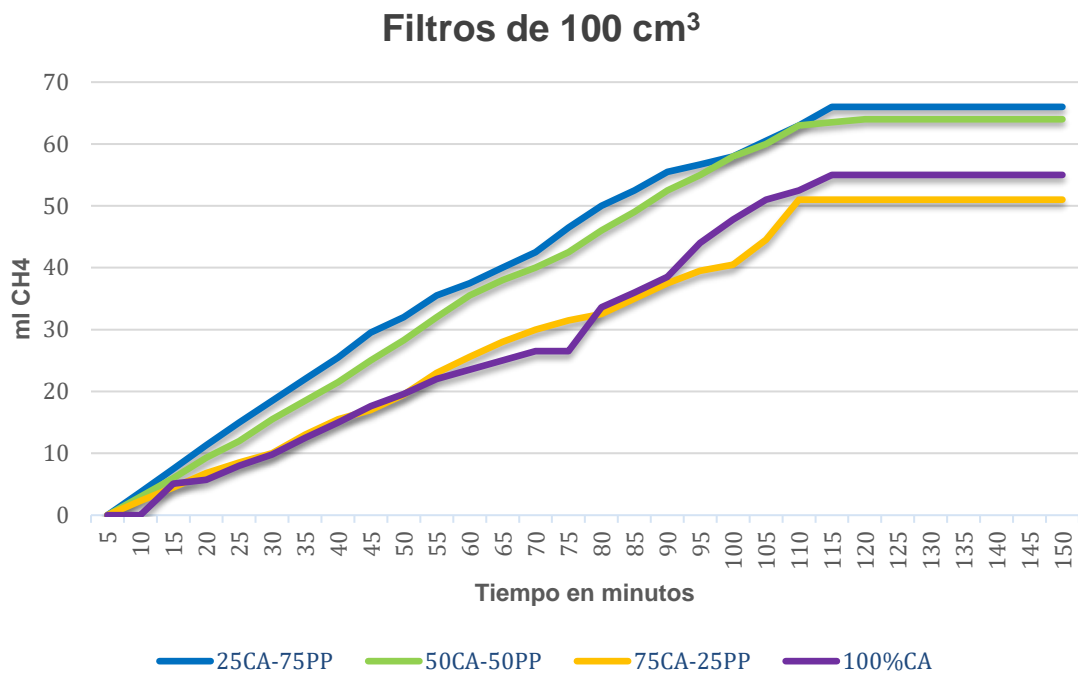


Figura 12. Volúmen de CH₄, obtenido a lo largo del tiempo después de los filtros de 100 ml.

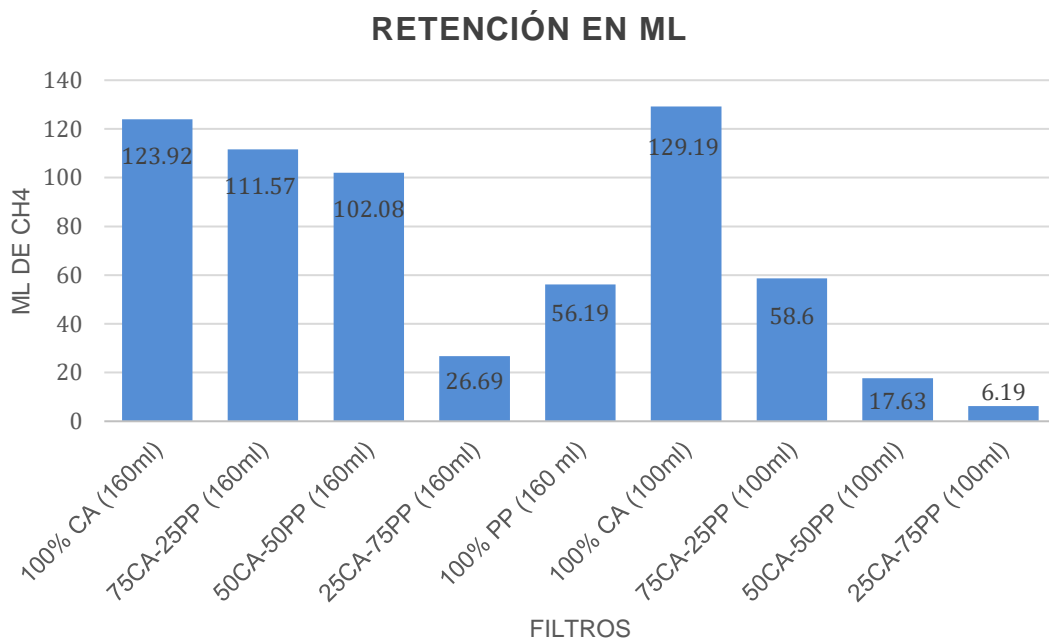


Figura 13. Volumen de metano retenido en todos los filtros a condiciones normales.

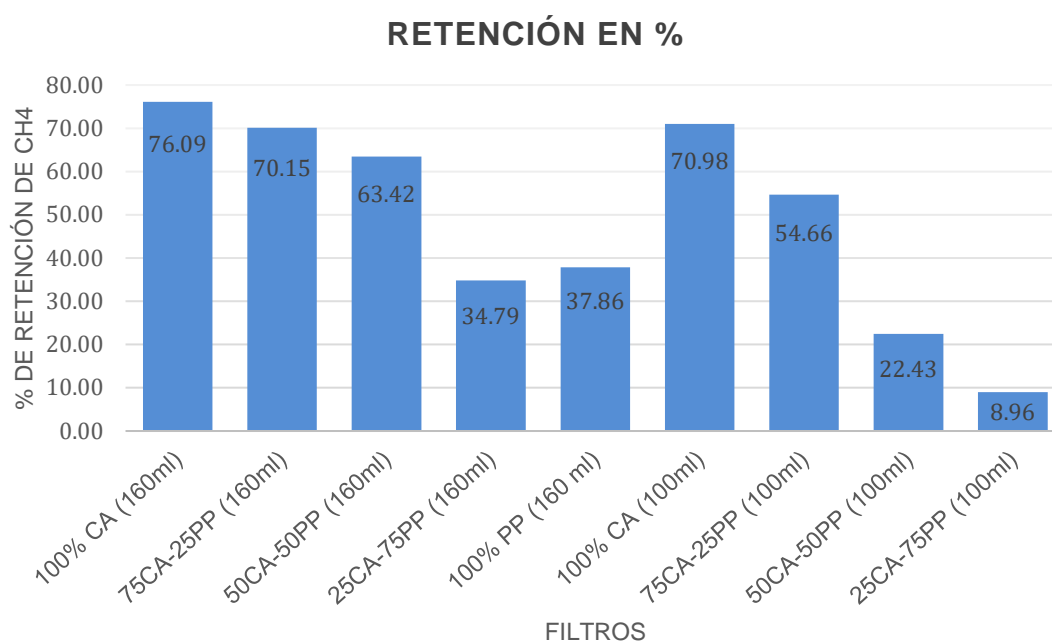


Figura 14. Porcentaje de metano retenido de cada uno de los filtros a condiciones normales.

4. DISCUSIÓN

Al analizar la Figura 15, se puede denotar que la saturación en un filtro con carbón activado que presenta un diámetro de 3 mm crece a partir del segundo día de su uso y la eficiencia empieza a reducirse mucho después (Gallego Piñol, 2013), esto permite suponer que los filtros utilizados en el presente estudio no se saturaron ya que el tiempo de acción de los filtros en cada sistema fue de aproximadamente dos horas, en consecuencia la saturación no es un factor relevante en nuestros resultados. Otro aspecto importante que mencionar es que la humedad relativa puede tener una considerable influencia sobre la capacidad adsorbente de los filtros, para el propósito de este estudio se estima que la humedad relativa se encuentre entre el 30 y el 60% lo cual cumpliría con las condiciones ambientales adecuadas para el correcto funcionamiento de los filtros indicada en la Norma Técnica de Prevención 972 (NTP 972), aunque estos pudieron variar ya que cada filtro estaba completamente cerrado.

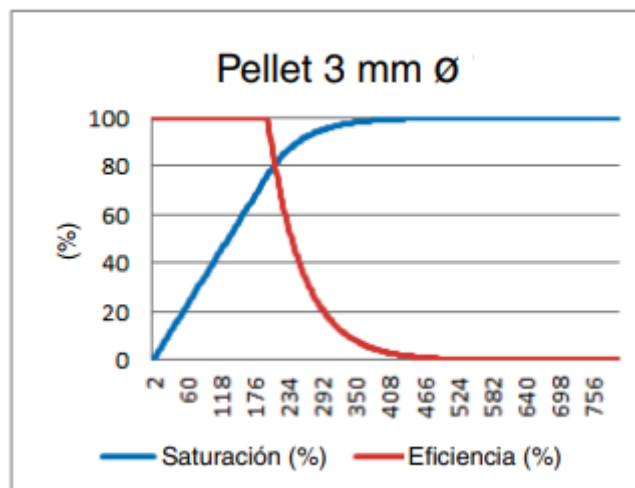


Figura 15. Funcionamiento de un filtro de carbón activo en el tiempo plt 3. Adaptado de (Gallego Piñol, 2013).

Los resultados expuestos en la (Figura 13) muestran una clara relación entre la cantidad de carbón activado en cada filtro y la retención de metano. El filtro que contiene 100% carbón activado con un lecho de 100ml y 0% piedra pómez; es el que mayor volumen de metano adsorbió (129.19 ml), mientras que el filtro de 100 ml, que contiene un lecho de 25% carbón activado y 75% piedra pómez es el que menor cantidad de mililitros de metano adsorbió (6.19 ml). Esto acentúa más la relación previamente mencionada.

Esta tendencia es similar en los filtros con lecho de 160 ml siendo nuevamente el filtro que contiene 100% carbón activado el que mayor volumen de metano adsorbió (123,92 ml), mientras que el filtro que contiene una composición de 25% carbón activado y 75% piedra pómez es el que menor volumen de metano adsorbió (26.69 ml). Sin embargo; el filtro con 100% piedra pómez no cumple dicha tendencia ya que este retuvo más volumen de metano que el filtro de 25CA-75PP, dando solo en este filtro una pequeña inconsistencia. Es importante recalcar que los valores iniciales de metano que se almacenaron antes de dejar pasar por cada uno de los filtros de 160 ml fueron similares de alrededor de 240 ml, lo cual reduce la influencia de la presión obteniendo valores de sistemas en similares condiciones. La Figura 14, muestra el porcentaje de retención de metano en cada filtro. Así, el filtro con lecho de 100ml que contiene 100% carbón

activado y 0% piedra pómez, es el que mejor resultados mostro con una eficiencia de 70.98%, mientras que el filtro con lecho de 100 ml que contiene 25% carbón activado y 75% piedra pómez es el menos eficiente con un valor de 8.96%. Similar comportamiento se observa en el filtro de 160 ml, con un 76.09 %, con el 100% de carbón activado.

Los resultados muestran una tendencia, mientras menor es la cantidad de carbón activado, menor es la eficiencia de los filtros. Esto es más evidente cuando la cantidad de carbón activado es menor al 50%. La excepción de esta tendencia se da en el filtro con 100% piedra pómez.

En el estudio de Gallego Piñol (2013) evaluaron y determinaron la eficiencia de varios filtros con diferente composición de carbón activado utilizando condiciones similares a la de este trabajo, los resultados de dicho estudio muestran una eficiencia del 87% para un filtro con 100% carbón activado y por cada 30% de carbón activado que se retira del filtro la eficiencia se reduce en un 15%, si observamos los resultados que se obtuvieron en este trabajo se puede evidenciar congruencias ya que el filtro con mayor eficiencia se aproxima al valor de 87% y los filtros con 25% menos de carbón activado muestran una reducción de eficiencia del 7% lo cual no es muy distante a la reducción del 15% obtenida en el estudio de Gallego Piñol. Por otro lado los filtros con 100% piedra pómez mostraron eficiencias bajas de 37%, este valor no discrepa mucho del 26% obtenido en el estudio obtenido del Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato, (2018) en el cual evaluaron filtro compuestos de piedra pómez, la diferencia entre dichos resultados y los obtenidos en este trabajo puede deberse a que los filtros fueron diseñados no en forma de empaque si no en forma de malla, pero se tomó en cuenta ese estudio ya que las condiciones fueron similares a la que se utilizaron en este trabajo. Estos resultados son congruentes además con lo expuesto en el estudio de López Chalarca, que afirman que la porosidad del material adsorbente es de suma relevancia, ya que para el almacenamiento de gas contaminado como metano se necesita una micro porosidad, debido que al existir una mayor área superficial de partícula este

puede captar más fácilmente estos compuestos y hacer que el gas contaminado se adhiera a la estructura del carbón. En el estudio mencionado se utiliza carbón activado con un tamaño de partícula máximo de 3.5 mm y mínimo de 1.7 mm, mientras que en este estudio el tamaño medio de partícula del carbón activado que se utilizó es de 2.7 mm, además la cantidad de microporos del carbón activado que usa Chalarca es similar al que se utilizó en este estudio con una microporosidad de alrededor del 90% con radio de poro de 1.8 mm., en comparación con el material de Chalarca que es del 93% y radio de poro de 1.6 mm. (Universidad Nacional de Colombia, 2013).

Las propiedades de micro porosidad no son tan evidentes en la piedra pómez lo cual reduciría el proceso de adsorción en las unidades utilizadas, como se vio en los filtros con mayor cantidad de piedra pómez tanto en los ensayos de filtros con lecho de 100 y 160 ml. Por otro lado, la humedad dentro del filtro podría afectar el proceso de adsorción. Son conocidas las excelentes propiedades hidrofílicas de la piedra pómez (Chávez, 2011), factor que puede afectar favorablemente la capacidad de retención de metano gracias al agua atrapada por el material, esto justificaría el por qué, el filtro con 100% piedra pómez presento mejores rendimientos que los filtros con una composición de carbón activado de solo el 25%.

En otro aspecto, se puede analizar la (Figura 12) la misma que nos muestra el paso de metano después del filtro a lo largo del tiempo. Se evidencian dos tendencias marcadas, la primera; la homogeneidad de los resultados en los filtros con lecho de 100 ml de 25% carbón activado y 75% piedra pómez y el filtro del mismo lecho con 50% de carbón activado y piedra pómez. Si bien el filtro de 50% carbón activado y 50% piedra pómez el que más retención presento, aunque esta no tiene una diferencia significativa. La segunda tendencia, está dada por los filtros con lecho de 100 ml de 100% carbón activado y el filtro de 75% carbón activado y 25% piedra pómez, los cuales muestran líneas de crecimiento irregulares pero similares en la cual nuevamente no hay una diferencia significativa.

Además, en la primera tendencia mencionada se puede ver que hasta el minuto 90 la separación de la línea de crecimiento de los dos filtros es constante, pero a partir de ese tiempo esta línea se une solo para terminar con una pequeña diferencia hasta el minuto 120. En la segunda tendencia se puede ver que ambas líneas de crecimiento de los filtros están casi juntos y constantes hasta el minuto 60, pasado dicho tiempo se nota las irregularidades que se mantienen hasta el minuto 120 aproximadamente.

En los filtros de 160 ml a lo largo del tiempo, se observa que los filtros que contienen 75%, 50% y 25% de carbón activado (Figura 11), muestran una tendencia de crecimiento similar, que se mantiene hasta el minuto 85, para luego separarse irregularmente, donde se puede ver que el filtro con 75% carbón activado es el que menor cantidad de metano dejó pasar a la segunda probeta, es decir que fue el que retuvo más CH_4 de los tres filtros mencionados. Para el caso del filtro con 100% carbón activado, se muestra una tendencia de crecimiento mucho menor y más homogénea lo cual conlleva relación con el alto rendimiento de adsorción de metano mostrado en la (Figura 14), mientras que el filtro con 100% piedra pómez es el que mayor cantidad de metano permitió pasar traduciéndose en una baja retención de metano y por ende un bajo rendimiento en los ensayos como se puede ver en la (Figura 13) a pesar de que no fue el de menor rendimiento debido al factor de humedad explicado previamente.

Uno de los factores más importantes para el proceso de adsorción es la presión del ambiente ya que este facilita o dificulta que el gas pueda ser retenido en la estructura del carbón y la piedra pómez además de que afecta indirectamente otros parámetros para un proceso correcto tales como la densidad y la densidad relativa, es así como el llamado empaquetado del metano puede reducirse o mejorar según la presión a la cual se somete, esto se relaciona con los resultados viéndose que la cantidad de metano inicial debe ser adecuada (240ml) para permitir la presión suficiente para el paso al resto del sistema (Castelló, 2019).

Con la explicación previa y las diferencias entre los resultados que se exponen en la (figura 11 y figura 12) se puede decir que; aunque la diferencia es mínima estos resultados podrían ser más acertados si el volumen inicial que se deja pasar es igual en todos los filtros de 100 ml. Todo esto permite evidenciar que la presión si cumple un rol importante en los ensayos corroborando lo expuesto en el estudio de Castelló (2019).

Para una potencial aplicación a escala industrial, es indispensable la definición de costos de construcción del filtro, escalando los costos del modelo de laboratorio, el precio por unidad de cada filtro se puede ver en la (Tabla 8). El desglose de los materiales utilizados están detallados en el (Anexo 10 y Anexo 11).

Tabla 8

Costo por unidad de los filtros utilizados en el laboratorio y filtros a escala real.

Filtros	100% CA	75% CA	50% CA	25% CA	100% PP
Costo total del filtro usado en laboratorio	17.6	17.47	17.32	17.19	17.04
Costo total estimado del filtro a escala real	124.3	122.76	121.25	119.7	118.1

Nota. Todos los valores están expresados en dólares (USD) y por unidad. Los valores mostrados aquí son estimaciones aproximadas para el caso de los filtros a escala real. Los filtros a escala real tienen un diámetro de 26 cm y 50 cm de largo.

Primeramente, se debe decir que el filtro se podría aplicar en cualquier industria que genere metano un ejemplo es la industria ganadera, siendo uno de sus mayores problema la gestión del estiércol producido por el ganado, por lo tanto, implementar un filtro que puede adsorber y retener metano generado por estiércol bovino puede ser viable a una real aplicación, pero primero se debe diseñar un biodigestor el cual tendrá dos objetivos generar metano y abono orgánico; el abono se lo puede utilizar para cultivos y venderse mientras que el

metano al ser adsorbido por los filtro evitaría la contaminación, e incluso este gas se puede vender como combustible natural aplicando la desorción en el lecho de los filtros. Sabiendo la eficiencia de retención de metano diario de cada filtro, su peso de mezcla (carbón activado y piedra pómez) y con la ayuda de fichas técnicas de filtros de similares características que hay en el mercado, se logró calcular la retención de los filtros que se podrían utilizar a una escala mayor, utilizando como punto de partida la generación de CH₄ de una graja promedio en el Ecuador con aproximadamente 350 cabezas de ganado y que el estiércol de una vaca produce de 3 a 4 litros de metano diarios (Benaouda, 2017) se determinó un flujo diario de 1.4 m³ de CH₄ hacia los filtros a escala real con una eficiencia del 34.79% (lecho de 160 ml 25%CA-75%PP), lo cual transformado a masa y tomando en cuenta la eficiencia del filtro representa 0.12 toneladas de CH₄ al

El quinto reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) expone los índices de potencial de calentamiento global en el cual el metano generado por la industria ganadera tiene un valor de 21 en CO₂ equivalente (Pachauri, 2014), este reporte permitió calcular cuánto CO₂eq podría retener el filtro a escala real obteniendo un resultado de 2.5 toneladas de CO₂ equivalente anuales, estos valores sumados a los datos de 6 dólares por tonelada de CO₂ que expone el Panel de precios de carbono del Banco Mundial (Banco Mundial, 2019) permitieron determinar un ahorro anual de 14.72 dólares, mientras que para el filtro con una eficiencia del 77% el ahorro anual es de 32.6 dólares.

Posterior mente se calculó el valor actual neto (VAN) que fue un resultado negativo de 3.65 dólares y la tasa interna de retorno (TIR) de 6%, ya que el VAN es menor a cero y el TIR es igual a la tasa de interés determinada por el BCE (Banco Central del Ecuador, 2019) se podría decir que la compra del filtro con baja eficiencia no es rentable, además el retorno de la inversión se daría en aproximadamente 19 años, mientras tanto que en el caso del filtro con mayor eficiencia de casi 77% (filtro con mejor rendimiento en ensayos) los valores del

VAN fueron de 14.79 dólares y con TIR de 9% haciendo este filtro rentable pero no puede catalogarse como viable debido a que el retorno de la inversión se daría en aproximadamente 5 años y 7 meses (Anexo y Anexo).

Dado que la compra del filtro con mayor eficiencia a gran escala es rentable pero los retornos de inversión son a plazos muy largos y no se ha tomado en cuenta la construcción del biodigestor, la decisión sobre la viabilidad real debería basarse en otros criterios, como el mejoramiento de la reputación e imagen de la empresa ante sus clientes y la sociedad, ya que la compra del filtro podría facilitar a la obtención de certificados y reconocimientos ambientales, esto se traduce en la apertura de nuevos mercados y un mejor posicionamiento de los productos o servicios que ofrezca dicha empresa (Orozco, 2014). Sin embargo, hay que señalar la importancia de realizar pruebas a escala y tamaño real ya que de esta manera se podría conocer realmente la eficiencia de los filtros y por ende determinar con fundamentos más acertados la rentabilidad y viabilidad de dichos filtros.

Además, como se puede ver en la (Tabla 8) la diferencia entre el coste inicial del filtro con mayor eficiencia y el de menor eficiencia no es considerable pero sus retornos de inversión y rentabilidad si lo son, lo cual no dejaría duda que un filtro con una composición de entre el 100% al 75% de carbón activado y alrededor del 25% piedra pómez es la mejor opción, siendo estos rangos los que obtuvieron los mejores resultados tanto en el laboratorio como para un desarrollo hipotético en la industria del Ecuador.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los filtros rellenos de un lecho compuesto de carbón activado y piedra pómez molida demostraron ser capaces de adsorber y retener metano extraído de biogás. La proporción de componentes de la mezcla de carbón activado y piedra pómez molida, es el factor más relevante para determinar cuan eficientes pueden llegar a ser cada uno de los filtros.

Los filtros con mayor cantidad de carbón activado son los que mejores resultados de eficiencia presentaron. Sin embargo, se logra notar que la piedra pómez molida cumplió un rol importante reteniendo humedad y facilitando el proceso de adsorción dentro de los filtros.

El filtro más efectivo para la adsorción de metano, fue el que contenía un lecho de 160 ml con una composición de 100% carbón activado, con una eficiencia del 76.1%. Cuatro filtros obtuvieron eficiencias de más del 54%, el filtro menos efectivo con un lecho de 100 ml, fue el que contenía 25% carbón activado y 75% piedra pómez, con una eficiencia del 9%.

EL promedio de eficiencia de los filtros con más del 50% de carbón activado es del 68%, para los filtros con 50% o menor cantidad de carbón activado, es del 33%. La presión generada por el metano dentro de la primera probeta incidió directamente sobre la cantidad disponible de CH_4 que el filtro puede procesar.

La conclusión de que, a mayor cantidad de piedra pómez dentro del filtro existirá menor eficiencia y a mayor cantidad de carbón activado existirá mayor eficiencia, demuestran que los resultados en este estudio son consistes entre sí, lo que permite evidenciar que el diseño y construcción de los filtro se apegaron bastante a la metodología, que buscó reducir al máximo la pérdida de gas y que a su vez

estos se acoplen de manera correcta a un sistema que permita la experimentación en el

Además, la interpretación de la cantidad de metano antes y después de los filtros fue la base para determinar la eficiencia de estos, lo que permitió realizar un análisis costo-beneficio de los filtros en una escala real, estimar la viabilidad de los filtros, valorar los beneficios ambientales de su implementación, el aporte económico en mecanismos de financiamiento verde y ser el punto de partida para reconocimientos ambientales a industrias del Ecuador. Por lo tanto, utilizando las estimaciones de este trabajo se logra notar que los filtros con alta eficiencia podrían ser viables para un futuro desarrollo

5.2. Recomendaciones

La presión dentro de los sistemas, en especial en la primera probeta represento un factor a tomar en cuenta para la obtención de los resultados, por lo tanto, se recomienda que si se utiliza la metodología de este estudio los volúmenes de metano dentro de la primera probeta sean iguales antes de permitir el paso hacia el filtro, con esto se lograría reducir los errores en las mediciones, ya que los filtros se encontrarían en condiciones casi similares para la fase

Se recomienda analizar la eficiencia de los filtros presentados en este estudio realizando las mediciones con un dispositivo especializado para la medición de biogás o metano, como por ejemplo un equipo de MilligGascounter empleando una medición continua. Buscando así obtener resultados más precisos de los que se puedan obtener con un método de desplazamiento volumétrico en probetas, además utilizar dicho equipo permitiría mantener presiones constantes e iguales ya que este parámetro se puede controlar en un MilligGascounter.

La preparación de los matraces con la mezcla de estiércol y agua destilada es uno de los factores más importantes para la obtención de biogás en volúmenes adecuados, por ende se recomienda realizar en un futuro nuevos ensayos con

diferentes relaciones de sustratos e inóculos que puedan favorecer la generación de biogás, lo cual reduciría el tiempo necesario para alcanzar un volumen de metano adecuado en la primera probeta de los sistemas y por consiguiente se reducirían los tiempos de experimentación.

Por último, se debería extender el alcance de este estudio con la realización de pruebas a escala y tamaño real ya que de esta manera se podría conocer realmente la eficiencia de estos filtros y por ende realizar un análisis costo-beneficio más aproximado, para así determinar la rentabilidad y viabilidad de dichos filtros a una escala industrial.

REFERENCIAS

- Repositorio de la Universidad de Guayaquil. (2018). Incremento del Rendimiento de Metano en la Digestión Anaerobia de Aguas Residuales del Proceso de Café. (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química. Recuperado el 11 de marzo de 2019 de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/27910>
- Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato. (2018). Análisis de la piedra pómez como material biodegradable y filtrante en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la Curtiduría Artesanal Palahua, ubicado en la parroquia Totoras, del cantón Ambato y de la provincia de Tungurahua. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Recuperado el 6 de abril de 2019 de <http://repo.uta.edu.ec/handle/123456789/28170>
- Alejandrina, G. P. (2012). Contaminación atmosférica. Recuperado el 10 de junio de 2019 de http://portal.uned.es/EadmonGuiasWeb/htdocs/abrir_fichero/abrir_fichero.jsp?idGuia=33695
- Alier, J. M. (2004). Los conflictos ecológico- distributivos y los indicadores de sustentabilidad. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)*. 1, 21-30. Recuperado el 22 de mayo de <https://journals.openedition.org/polis/5359>
- Angelidaki, I., Alves, M., y Bolzonella, D. (2009). *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays*. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. <http://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Standard Methods. (2012). *Standard Methods for the Experimental of Water and Wastewater*. Standard Methods, 54. <http://doi.org/ISBN9780875532356>
- Bagreev, A. (2004), *Bituminous coal-based activated carbons modified with nitrogen as dsorbents of hydrogen sulfide*. 42(3), 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2003.10.042>

- Ballester Díez, F. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 109-121. Recuperado el 2 de mayo de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200002
- Banco Central del Ecuador. (2019). Tasas de Interés. Recuperado el 30 de mayo de 2019 de <https://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>
- Benaouda, M. (2017). Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(4), 965-974. Recuperado el 17 de mayo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/322670418_Estado_de_la_investigacion_sobre_emisiones_de_metano_enterico_y_estrategias_de_mitigacion_en_America_Latina
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). Fabricación de monolitos de carbón activado para captura de gases contaminantes. (Tesis Doctoral), Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 13 de junio de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/304715344_Fabricacion_de_monolitos_de_carbon_activado_para_captura_de_gases_contaminantes
- Biloé, S., V., y Goetz, A. (2002), *Optimal design of an activated carbon for an adsorbed natural gas storage system*. *Carbon*, 40(8), 1295-1308. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00287-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00287-1)
- Carmona, J. C. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 49-63. Recuperado el 19 de abril de 2019 de <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v18n1/v18n1a06.pdf>

- Castelló, D. L. (2019). Grupo Español del Carbón. Recuperado el 9 de junio de 2019 de http://www.gecarbon.org/Boletines/articulos/boletinGEC_002_art.1.pdf
- Repositorio de la Universidad de Alicante. (2001). Preparación y caracterización de materiales carbonosos avanzados para la separación de gases y el almacenamiento de gases y energía. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/5562>
- Castells, X. E. (2012). Reciclaje y tratamiento de residuos diversos: Reciclaje de residuos industriales. Recuperado el 14 de marzo de 2019 de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788353.pdf>
- Celeste, Y., López, V., y Carrión, S. M. (2018). *Adsorption and oxidation of carbon monoxide in a sheet of β -Graphyne : Theoretical study*. Scielo. doi: 10.1590/s1517-707620180002.0445
- Chávez, C. H. (2011). Biofiltración de ácido sulfhídrico (H₂S), utilizando bagazo de caña de azúcar y piedra pómez como material de soporte. *Ingeniería y Competitividad*, 5(2), 7-15. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de <http://hdl.handle.net/10893/1554>
- Cohen, Y. (2001). *Biofiltration - The treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review*. *Bioresource Technology*, 77(3), 257-274. [http://doi:10.1016/S0960-8524\(00\)00074-2](http://doi:10.1016/S0960-8524(00)00074-2)
- Cornejo, C., y Wilkie, A. C. (2010). De Estiércol a Energía-Captura de Metano en Ecuador. *Revista Tecnológica*, 23(1). Recuperado el 12 de marzo de 2019 de https://www.academia.edu/36709686/De_Esti%C3%A9rcol_a_Energ%C3%ADa_-_Captura_de_Metano_en_Ecuador
- Cortés, F. B. (2009). Adsorción de Agua en Materiales compuestos y en Zeolita. Recuperado el 15 de abril de 2019 de https://scholar.google.com.ec/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Ads

orci%C3%B3n+de+agua+en+materiales+compuestos+y+en+zeolita
&btnG=

- Environmental Protection Agency. (1998). *Locating and estimating air emissions from sources of arsenic and arsenic compounds*. Office of Air Quality EPA454R98013 279, 297-298. <http://doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Jiménez, E. (2006). Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno. *Scielo*. (2), 9-20. Recuperado el 9 de abril de 2019 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372005000100002&script=sci_arttext&tlng=pt
- Ferré, J. (2002). Introducción al diseño estadístico de experimentos: TECNICAS DE LABORATORIO. Recuperado el 10 de marzo de 2019 de <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/dis.pdf>
- Universidad Autónoma de Nuevo León. (1997). Oxidación Biológica (*Thiobacillus*) de Gases Azufrados y Uso del Efluente como Fertilizante Agrícola. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado el 5 de abril de 2019 de <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/547>
- Gallego Piñol, E. (2013). Calidad de aire interior: Filtros de carbón activo para su mejora. Recuperado el 15 de abril de 2019 de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/24934/989%20w.pdf>
- Garreaud, R., y Rutllant, J. (2015). Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago. *Colección de Química*, (2), 36-53. Recuperado el 13 de junio de 2019 de http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Libro_CA.pdf
- Guerrero, J. J. (2013). Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica. Recuperado el 14 de marzo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/258499252_Cianuro_Toxicidad_y_Destruccion_Biologica
- Guyer, F. G. (2011). Ética y estética del metano: Uruguay y las negociaciones sobre cambios climáticos. *Letras Internacionales*, 127(5), 12-15.

- Recuperado el 14 de marzo de 2019 de <https://revistas.ort.edu.uy/letras-internacionales/article/view/1015>
- Hernández, J., y Aguilar, H. (2017). Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. *Lacandonia*, 5(2), 149-158. Recuperado el 18 de marzo de 2019 de <https://cuid.unicach.mx/revistas/index.php/lacandonia/article/view/258>
- Izquierdo, J. (2004). Cinética de las reacciones químicas. Recuperado el 7 de junio de 2019 de https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/miembros/Web_Sofia/GRUPOS/Tema%206.pdf
- Mejía, A. R. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Scielo*, (32), 118-143. <http://doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10>
- Linares-Solano, A. (2008), *Controlling Porosity to Improve Activated Carbon Applications. Recent Advances in Adsorption Processes for Environmental Protection and Security*. Recuperado el 2 de junio de 2019 de <https://www.springerprofessional.de/en/controlling-porosity-to-improve-activated-carbon-applications/1607618>
- Repositorio de la Universidad Federal de Santa Catarina. (2008). *Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica*. (Tesis de pregrado). Universidad Federal de Santa Catarina. Recuperado el 27 de abril de 2019 de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/131678>
- Universidad Nacional de Colombia. (2013). Activación de carbones para aplicación en almacenamiento de gas natural vehicular (metano). (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Recuperado el 8 de marzo de 2019 de <http://www.bdigital.unal.edu.co/9552/1/1020401768.2013.pdf>
- Repositorio de la Universidad Central del Ecuador. (2015). Propuesta de un modelo de gestión turística sostenible para la consolidación del ecoturismo en la cabecera cantonal Machachi del Cantón

- Mejía. (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito. Recuperado el 16 de abril de 2019 de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4527>
- Mesquida, F. (2019). Agroindustria Buenos Aires trabaja con cooperativas para impulsar proyectos de bioenergía. Recuperado el 6 de julio de 2019 de <https://www.infocampo.com.ar/trabajo-con-cooperativas-bonaerenses-para-impulsar-proyectos-de-bioenergia/>
- Moreno, M. T. (2011). Manual de biogás. Recuperado el 23 de abril de 2019 de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Banco Mundial. (2019). Panel de Fijación del Precio del Carbono: Definición de una visión transformadora para 2020 y años venideros. *Cumbre Paris*. Recuperado el 10 de junio de 2019 de <http://www.bancomundial.org/es/news/speech/2016/04/21/carbon-pricing-panel---setting-a-transformational-vision-for-2020-and-beyond>
- Múnera, J. L., Alvarado-Torres, P. N., y Machado, W. R. (2017). Efecto del contenido de oxígeno y metano en la cinética de oxidación de un carbonizado de carbón. *Revista AC*, 41(159), 221-229. Recuperado el 15 de junio de 2019 de <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/452>
- Ordeñada, L. (1996). Metodología de filtración experimental con base en filtros de lecho poco profundo. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 25, 1-6. Recuperado el 15 de junio de 2019 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02073e14.pdf>
- Orozco, Y. V. (2014). Responsabilidad Social Empresarial: Teorías, índices, estándares y certificaciones. *Cuadernos de administración*, 29(50), 196-206. Recuperado el 17 de mayo de 2019 de <http://www.scielo.org.co/pdf/cuadm/v29n50/v29n50a09.pdf>
- Ortega Viera, L., y Rodríguez Muñoz, S. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 36(1), 45-56. Recuperado el 3 de marzo de 2019 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000100004

- Pachauri, R. K. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el 22 de mayo de 2019 de https://epic.awi.de/id/eprint/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf
- Palencia, A., Romero, G., y Danielle, E. (2008). Las muestras en toxicología forense. Importancia de la cadena de custodia. *Salus*, 12(3), 52-56. Recuperado el 25 de marzo de 2019 de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=375938988011>
- Ramírez, M. (2006). Estudio y puesta en marcha de un sistema de eliminación de ácido sulfhídrico en una corriente de aire, mediante un biofiltro de escurrimiento con *Thiobacillus Thioparus* inmovilizado en espuma de poliuretano. Recuperado el 17 de junio de <https://www.semanticscholar.org/paper/Estudio-y-puesta-en-marcha-de-un-sistema-de-de-en-Ramirez/32092aef9cdd3cf7bc0be06f2a80462ddfbfd701>
- Redagrícola. (2017). Biogás en Chile y el mundo: Tecnología que transforma un costo en beneficio. Recuperado el 6 de julio de 2019 de <http://www.redagricola.com/cl/lo-basico-entender-biogas/>
- Rojano, R. E., Mendoza, Y. I., Arregoces, H., y Restrepo, G. M. (2016). Dispersión de Contaminantes del Aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de Gas Natural. *Información tecnológica*, 27(5), 99-110. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000500012>
- Shim, W.G. (2006), *Performance evaluation of wash-coated MCM-48 monolith for adsorption of volatile organic compounds and water vapors. Microporous and Mesoporous Materials*, 94(1–3), 15-28. <http://doi:10.1016/j.micromeso.2006.03.024>
- Sosa Hernández, D. B., y Viguera Cortes, J. M. (2014). La Biofiltración: Una Alternativa Sustentable Para El Tratamiento De Aguas Residuales. *Vidsupra*, 6(2), 67-72. Recuperado el 2 de junio de 2019 de

<https://mx/bitstream/123456789/24059/1/VIDSUPRA%20VOL%206%20NUM%202.pdf#page=12>

- Thalasso, F., y Pineda Olmedo, R. (2002). Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado. *XX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería*. Recuperado el 20 de febrero de 2019 de https://www.researchgate.net/profile/Frederic_Thalasso/publication/228594656_Biofiltracion_tratamiento_biologico_de_aire_contaminado/links/54c79ae60cf22d626a36b3f5/Biofiltracion-tratamiento-biologico-de-aire-contaminado.pdf
- Torres, L. P. (2012). Evaluación a escala piloto del efecto de las características del medio filtrante sobre el proceso de filtración rápida descendente tratando agua clarificada de la planta de potabilización de Puerto Mallarino. Recuperado el 22 de junio de 2019 de https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria%20de%20Medio%20Ambiente/alertab-18.pdf
- Torres Rodríguez, D. (2003). El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Revista Científica Y Técnica De Ecología Y Medio Ambiente*, 13(2), 5-6. <http://doi:10.1590/S0104-14282003000200004>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas. Organización Panamericana de la Salud. Recuperado el 11 de marzo de 2019 de <https://es.scribd.com/document/405328833/Guia-Para-Diseno-de-Sistemas-de-Tratamiento-de-Filtracion-en-Multiples-Etapas>
- Environmental Protection Agency. (2001). *METHOD 1684 Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids Draft January 2001 U. S. Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division (4303)*, 1–13. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de <http://fliphtml5.com/mlnx/vgmx>

- Varnero, M. T. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato. (2018). Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Centro de Faenamiento Ocaña del cantón Quero. (Tesis de Maestría), Universidad Técnica de Ambato. Recuperado el 13 de mayo de 2019 de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/27232>
- Wang, X. L. (2010), *Adsorption Measurements of Methane on Activated Carbon in the Temperature Range (281 to 343) K and Pressures to 1.2 MPa*. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55(8), 2700-2706. <http://doi:10.1021/je900959w>
- Zapata, F. G. (2004). Fundamentos y Casos Exitosos de la Biotecnología Moderna. Recuperado el 4 de marzo de 2019 de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/comunicacion/publicaciones-y-documentos-de-interes/item/fundamentos-y-casos-exitosos-de-la-biotecnologia-moderna>

ANEXOS

Anexo 1.

Anotación de los volúmenes de metano después del filtro de 160 ml a lo largo del tiempo

Filtros	75CA-25PP	50CA-50PP	25CA-75PP	100%CA	100%PP
5 min	0	0	0	0	0
10 min	2.3	2.6	0	1.6	0
15 min	4.52	5.4	2.7	3.3	7.6
20 min	6.9	8.2	5	5.2	15
25 min	9.3	10.6	7.5	6.5	18
30 min	11.5	13.4	10.4	8	22
35 min	13	16	13.1	9.7	25.5
40 min	16.2	18.5	15.7	11.4	31.5
45 min	18.5	21.3	18.6	13.5	35.5
50 min	20	24.4	21.2	15	38.8
55 min	23.2	27	23.9	16.6	43.5
60 min	25.4	29.8	27	18.3	45
65 min	27.5	32.5	29.6	20	48.3
70 min	29.8	34.6	32.1	22	52.6
75 min	32.2	37.6	34	23	55.7
80 min	34.4	40.3	36.2	24.6	59.5
85 min	36.6	43.6	39	26.3	61
90 min	39.7	43.6	39	28	61
95 min	41.4	48.5	41.9	29.5	64.3
100 min	44.3	51.3	44	31.8	68.3
105 min	45.7	53.4	47.4	32.8	74.2
110 min	47.8	56.6	51.2	34	81
115 min	50	59.3	54	36.2	87.6
120 min	50	62	54	38.5	96
125 min	50	62	54	39.7	96
130 min	50	62	54	41	96
135 min	50	62	54	41	96
140 min	50	62	54	41	96
145 min	50	62	54	41	96
150 min	50	62	54	41	96

Nota Todos los valores están en mililitros (ml). Las anotaciones fueron hasta el minuto 150 para asegurarse que no hay más burbujeo de metano en la segunda probeta

Anexo 2.

Anotación de los volúmenes de metano después del filtro de 100 ml a lo largo del tiempo

Filtros	75CA-25PP	50CA-50PP	25CA-75PP	100%CA
5 min	0	0	0	0
10 min	2.3	3	3.7	0
15 min	4.5	6	7.5	5.1
20 min	6.8	9.3	11.3	5.7
25 min	8.5	12	15	8
30 min	10	15.5	18.5	9.8
35 min	13	18.5	22	12.5
40 min	15.5	21.5	25.5	15
45 min	17	25	29.5	17.6
50 min	19.5	28.3	32	19.6
55 min	23	32	35.5	22
60 min	25.6	35.5	37.5	23.5
65 min	28	38	40	25
70 min	30	40	42.5	26.5
75 min	31.5	42.5	46.5	26.5
80 min	32.5	46	50	33.6
85 min	35	49	52.5	36
90 min	37.5	52.5	55.5	38.5
95 min	39.5	55	56.7	44
100 min	40.5	58	58	47.8
105 min	44.5	60	60.5	51
110 min	51	63	63	52.5
115 min	51	63.5	66	55
120 min	51	64	66	55
125 min	51	64	66	55
130 min	51	64	66	55
135 min	51	64	66	55
140 min	51	64	66	55
145 min	51	64	66	55
150 min	51	64	66	55

Nota Todos los valores están en mililitros (ml). Las anotaciones fueron hasta el minuto 150 para asegurarse que no hay más burbujeo de metano en la segunda probeta

Anexo 3: Muestreo de estiércol bovino para los biodigestores.



Anexo 4: Biodigestores para la generación de biogás.



Anexo 5: Sistemas para la evaluación de los filtros.



Anexo 6: Frascos lavadores con NaOH para la obtención de metano.



Resultados previos a los ensayos de los 3 mejores filtros

Anexo 7

Anotación de los volúmenes iniciales (antes de pasar por el filtro). Ensayo inicial.

Sistema	Última medición	Valor real (lecho 100ml)	Última medición	Valor real (lecho 160ml)
25CA-75PP	200 ml	72,5 ml	153,3 ml	82,8 ml
50CA-50PP	210 ml	82,5 ml	261,3 ml	190,8 ml
75CA-25PP	240 ml	112,5 ml	212,5 ml	142 ml
100% CA	260 ml	189,5 ml	285 ml	214,5 ml
100% PP	NA	NA	225 ml	154,5 ml

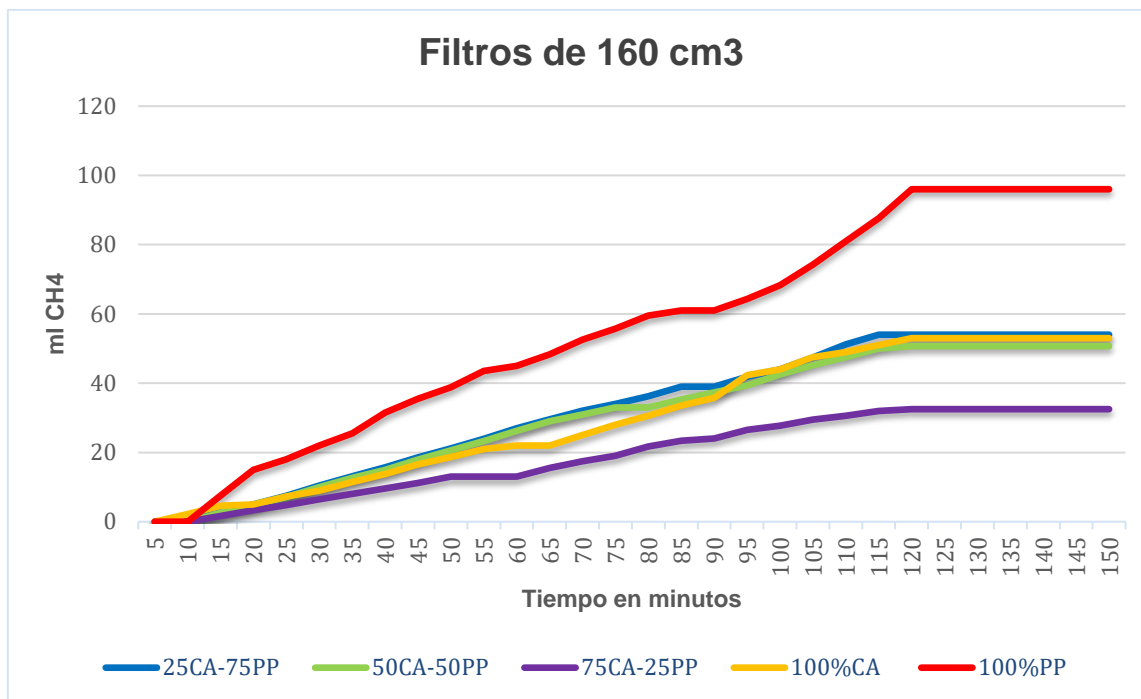
Nota. El valor real= volumen de la medición final restado del volumen que puede quedar atrapado en la tubería, filtro y dispositivos antes de llegar a la segunda probeta; NA= no existe ese valor ya que la experimentación con 100%PP se realizó únicamente con un lecho de 160 ml.

Anexo 8

Anotación de los volúmenes finales (después de pasar por el filtro). Ensayo inicial.

Sistema	Medición final (filtro 100ml)	PM	Medición final (filtro 160ml)	PM
25CA-75PP	66 ml	41,11 gr	54 ml	63,07 gr
50CA-50PP	64 ml	44,43 gr	50,7 ml	70,96 gr
75CA-25PP	51 ml	53,91 gr	32,5 ml	85,75 gr
100% CA	55 ml	80,34 gr	53 ml	89,68 gr
100% PP	Na	NA	96 ml	44,48 gr

Nota. PM= peso de mezcla dentro del filtro; Medición final= volumen de metano total que paso a la segunda probeta después del filtro de 100 y 160 ml; NA= no existe ese valor ya que la experimentación con 100%PP se realizó únicamente con un lecho de 160 ml.



Anexo 9. Volúmenes de CH₄ obtenido a lo largo del tiempo después de los filtros de 160 ml, (captados en la segunda probeta). Ensayo inicial.

Cálculos de los precios y rentabilidad de los filtros

Anexo 10.

Desglose de materiales y precios para filtros utilizados en el laboratorio

Material	100% CA	75% CA	50% CA	25% CA	100% PP
Tapa H tuvo 10"	4	4	4	4	4
Tuvo PVC 10" (26 cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Reg. de caudal (racor)	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Racor recto	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94
Carbón activado	0.86	0.65	0.43	0.22	0
Malla fina	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Piedra pómez	0	0.075	0.15	0.23	0.3
Sellantes	3	3	3	3	3
Valor total por unidad	17.6	17.47	17.32	17.19	17.04

Nota. Todos los valores están expresados en dólares (USD). Los valores mostrados aquí son costos de compra real.

Anexo 11.

Desglose de materiales y precios estimados para filtros a escala real

Material	100% CA	75% CA	50% CA	25% CA	100% PP
Tapa H tuvo 10"	20	20	20	20	20
Tuvo PVC 10" (26 cm)	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Reg. de caudal (racor)	55	55	55	55	55
Racor recto	16	16	16	16	16
Carbón activado	9.5	7.13	4.75	2.4	0
Malla fina	3	3	3	3	3
Piedra pómez	0	0.83	1.7	2.5	3.3
Sellantes	15	15	15	15	15
Valor total por unidad	124.3	122.76	121.25	119.7	118.1

Nota. Todos los valores están expresados en dólares (USD). Los valores mostrados aquí son estimaciones aproximadas.

Anexo 12

Cálculos de la ganancia, TIR y VAN por la retención de CH4 de un filtro con 34% de eficiencia.

Filtro 25%ca	Valor	Unidades		
Retención filtro	1400	Its CH4 diario		
	1.4	m3 CH4		
Retención filtro real	0.48706	m3 CH4		
Densidad de CH4	0.657	kg/m3		
Masa de CH4	0.320	Kg CH4 diario	Costo Inicial	\$ 119.17
	3.20E-04	tons CH4 diario	Ahorro anual	\$ 9.82
	0.12	ton CH4 anual	Tasa de Interés	6%
CO2 equivalente	2.5	ton CO2 eq anual	VAN	\$ -3.65
Precio de ton de CO2	6	\$/ton CO2eq	TIR	6%
Ganancia por bono de carbono	14.72	\$ anual	Retorno inversión	19.9 años

Anexo 13

Cálculos de la ganancia, TIR y VAN por la retención de CH4 de un filtro con 77% de eficiencia.

Filtro 100%CA	Valor	Unidades		
Retención filtro	1400	lts CH4 diario		
	1.4	m3 CH4		
Retención filtro real	0.9821	m3 CH4		
Densidad de CH4	0.657	kg/m3		
Masa de CH4	0.645	Kg CH4 diario	Costo Inicial	\$ 122.76
	6.45E-04	tons CH4 diario	Ahorro anual	\$ 24.64
	0.24	ton CH4 anual	Tasa de Interés	6%
CO2 equivalente	4.9	ton CO2 eq anual	VAN	\$ 14.79
Precio de ton de CO2	6	\$/ton CO2eq	TIR	9%
Ganancia por bono de carbono	29.7	\$ anual	Retorno inversión	5.7 años

Anexos 14

Cadena de custodia del muestreo de estiércol

Acción	Material y/o instrumento	responsables
Despeje del lugar de muestreo	Pala	Fabricio Vélez
Muestreo de estiércol (estiércol fresco)	Guantes de látex gruesos, overol y mascarilla	Fabricio Vélez
Almacenaje de estiércol	Fundas Ziploc colocadas dentro de un cooler a 10°C	Fabricio Vélez
Etiquetado de las muestras (fecha, contenido y peso)	Espero azul, papel adhesivo	Fabricio Vélez
Traslado	Automóvil	Fabricio Vélez
Recepción	Laboratorio Udla (se revisaron las muestras a	Fabricio Vélez y Verónica Mena

	su llegada y el cooler se colocó en un lugar fresco bajo sombra	
--	---	--

