



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Recuperación energética de porquinaza y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia.

Andrea Tamayo Londoño.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2014.

II Recuperación energética de porquinaza y formulación de insumos para un sistema
acoplado cerdos – pasto – en el norte de Antioquia

Recuperación energética y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia.

Andrea Tamayo Londoño

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo.

Director:

Ph.D., Raúl Zapata Hernández

Codirector:

Ph.D., Carlos Peláez Jaramillo

Línea de Investigación:

Recuperación energética y material

Grupo de Investigación:

Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares, GIEM. Universidad de Antioquia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2014

*A cada una de las personas que han marcado
fundamentalmente mi vida... a esa familia
que en cada rincón crece cada día más. A
Martín Hernández, quien continua
enseñándome y vivo en nuestra memoria.
Aún te encuentro por ahí caminando.*

*Dora Luz Londoño, ejemplo del ser mujer, de
ser madre, de ser amiga, de ser cómplice,
gracias por el apoyo y esa fortaleza
inquebrantable.*

Agradecimientos

A mi director el Doctor Raúl Zapata, quien me acompañó incansablemente en los momentos más difíciles.

A mi codirector el Doctor Carlos Peláez, a quien agradezco la enseñanza y el acompañamiento académico y humano en el proceso.

A Supercerdo S.A, y particularmente a Javier y Gustavo, quienes brindaron información fundamental para el proyecto y las muestras para el desarrollo de los experimentos.

A Katherine Rivera, Alejandro Ruíz y Lucas Blandón, compañeros de investigación que apoyaron incondicionalmente el diseño experimental y el proceso de análisis de resultados haciendo amenos y agradables cada uno de los procesos de este trabajo.

Al Grupo Interdisciplinario de Estudio Moleculares GIEM de la Universidad de Antioquia, por la financiación de la investigación y el acompañamiento académico.

A Juliana Pérez, Lina David y Ana Zuleta, por su apoyo en los momentos de duda, por permitirme discutir y aclarar cada una de las ideas en las fases de diseño y evaluación del impacto ambiental de la alternativa.

A Carolina Moreno, Vanesa Vasco y Luz Adriana Ramírez, porque la ciencia es humana, son constructos sociales e individuales, gracias por ser apoyo moral y fortaleza, hacer de un acontecimiento cada uno de los logros.

Resumen

La porquinaza es el residuo más importantes y de difícil manejo de los sistemas productivos porcícolos, debido a las características fisicoquímicas y microbiológicas, además de los altos volúmenes generados. La práctica común es la aplicación de la porquinaza en tierras de cultivo como fertilizante, sin embargo, esto se ha convertido en una problemática generando impactos ambientales negativos en el ecosistema en el que se ubica el sistema productivo.

En la presente investigación se propuso la implementación de un sistema de digestión anaerobia multi-etapa a escala piloto para la recuperación energética y material de la porquinaza, este cuenta con un reactor UASB (Upflow anaerobic sludge bed) conectado en serie con un FAFA (Filtro anaerobio de flujo ascendente), cada uno con un volumen útil de 28 L y 49 L respectivamente. El sistema fue operado a temperatura ambiente en un régimen continuo, modificando la tasa de carga orgánica mediante la variación de caudales para definir los rangos de operación óptima. Con la operación estable del sistema se obtuvo un porcentaje de remoción de materia orgánica del 89% (± 7), un rendimiento promedio de biogás de 0.723 L biogás L reactor⁻¹ d⁻¹ con un porcentaje de metano del 75%. La caracterización fisicoquímica del efluente, en comparación con la porquinaza fresca, evidencio altos contenidos de nitrógeno, baja relación carbono: nitrógeno, reducción significativa en el olor, ausencia de entero bacterias y *Salmonella* sp, además el lodo del reactor UASB tiene altas concentraciones de fosforo, es decir, que este sistema se configura como alternativa para la estabilización de la porquinaza, reduciendo la carga orgánica, eliminando los problemas sanitarios y generando biogás y un efluente con potencial para la fertilización de pastos.

Finalmente, la evaluación del impacto ambiental evidencio los beneficios ambientales de la implementación de este sistema de tratamiento.

Palabras clave: Porquinaza, Digestión Anaerobia, Reactor UASB (Upflow anaerobic sludge bed), Reactor FAFA (Filtro anaerobio de flujo ascendente), Potencial fertilizante, Evaluación de Impacto Ambiental.

Abstract.

Pig slurry is the most pollutant and hard to handle residue of the swine industry, because of physicochemical and microbiological characteristics and high volumes generate. Common practice is the application of pig slurry directly thought lands as a fertilizer, however, this has become a problem generating negative environmental impacts on the ecosystem in which the production system is located.

In this research was proposed the implementation of a pilot scale system of multi-stage anaerobic digestion for energy recovery and material recovery to pig slurry, the system has an Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) reactor connected in series to an Upflow anaerobic filter (UAF) reactor with a useful volume of 28 L and 49 L respectively. The system was operated at room temperature under continuous regime, modifying the organic loading rate (OLR) by varying flow rates to define optimal operating ranges. With stable operation of the system a remotion of organic matter of 89% (± 7) was obtained, and a yield biogas production of 0.723 L biogas L reactor day⁻¹ with 75 % of methane.

The physicochemical characterization of the effluent, as compared with fresh pig slurry, showed high levels of nitrogen, low relation of carbon-nitrogen , significant reduction in odor, absence of enterobacter and Salmonella sp, additionally, the UASB sludge has high concentrations of phosphorus, which means that this system can be an alternative for the stabilization of pig slurry, reducing the organic load, eliminating health problems, generating biogas and an effluent with potential for fertilization of grasses. Finally, the environmental impact assessment evidenced the environmental benefits of the implementation of this treatment system.

Keywords: Pig slurry, Anaerobic Digestion, UASB reactor (Upflow anaerobic sludge bed), AF reactor (Anaerobic Filter), Fertilizing Potential, Environmental Impact.

Contenido

	Pág.
Recuperación energética de porquinaza y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia.	I
Recuperación energética y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia.	III
Resumen	XI
Abstract.....	XII
Contenido	XIII
Lista de figuras.....	XVI
Lista de tablas	XIX
1. Introducción	1
1.1 Formulación del problema.	1
1.2 Justificación.	2
2. Hipótesis y objetivos.....	5
2.1 Hipótesis.....	5
2.2 Objetivos.....	5
2.2.1 Objetivo General	5
2.2.2 Objetivos específicos.	5
3. Marco de referencia.	6
3.1 Recuperación energética de porquinaza en un sistema productivo en el Norte de Antioquia.	6
3.1.1 Proceso de digestión anaerobia: Un breve resumen	7
3.1.2 Parámetros para la selección de un sistema de digestión anaerobia. ...	8
3.1.3 Principales parámetros de diseño de un proceso de digestión anaerobia.	11
3.2 Recuperación material de porquinaza en un sistema productivo en el Norte de Antioquia.	12
3.2.1 Efluente de la digestión anaerobia	13
3.2.2 Lodos de la digestión anaerobia.....	14
3.2.3 Requerimientos nutricionales de los cultivos	15
3.2.4 <i>Cynodon nlemfuensis</i> (Pasto Estrella, Tumba viejos) [52].....	16
2.3. Evaluación de los impactos ambientales de la recuperación energética y material de la porquinaza.....	17

4. Metodología.....	19
4.1 Recolección de la muestra.	19
4.2 Caracterización de la porquinaza.	19
4.2.1 Potencial Bioquímico Metanogenico (PBM)	20
4.3 Diseño del sistema de digestión anaerobia.	23
4.4 Arranque del sistema de digestión anaerobia.	24
4.5 Estabilización y monitoreo del sistema de digestión anaerobia.	27
4.6 Evaluación de la eficiencia del sistema de digestión anaerobia.	27
4.7 Ensayos de fertilización con el efluente y el lodo producido en la digestión anaerobia.....	27
4.7.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente y del lodo del reactor UASB.	28
4.7.2 Muestreo y caracterización fisicoquímica del suelo.....	28
4.7.3 Diseño experimental.	29
4.8 Evaluación del impacto ambiental de la recuperación energética y material de la porquinaza.	30
5. Resultados y discusión.	34
5.1 Diseño del sistema.	34
5.1.1 Potencial Bioquímico Metanogenico	34
5.1.2 Reactor UASB.	37
5.1.3 Reactor FAFA.....	38
5.2 Parámetros operacionales y de estabilidad del reactor UASB.	39
5.3 Parámetros operacionales y de estabilidad del reactor FAFA.....	49
5.4 Eficiencia global del sistema de tratamiento.	55
5.5 Potencial fertilizante del efluente y el lodo de la digestión anaerobia.....	57
5.6 Evaluación del impacto ambiental.	64
5.6.1 Diseño y análisis del sistema de tratamiento.	64
5.6.2 Normas aplicables en el manejo de residuos en sistemas productivos porcícolas.....	77
5.6.3 Línea base: Identificación del entorno en el que se desarrollara el proyecto.....	79
5.6.4 Previsión de los efectos que el proyecto generará sobre el medio.....	85
5.6.5 Matriz de importancia.....	85
6. Conclusiones y recomendaciones	93
6.1 Conclusiones.....	93
6.2 Recomendaciones.....	94
Anexo A: Efecto de las variables hidráulicas, orgánicas y de estabilidad sobre la DQO t del efluente del reactor UASB.....	96
Anexo B: Relación del porcentaje de remoción de materia orgánica con el rendimiento de biogás de acuerdo al volumen del reactor.....	97
Anexo C: Efecto de las variables hidráulicas y orgánicas sobre el porcentaje de remoción en el FAFA.	98
Anexo D: Matriz de importancia del proyecto del sistema de tratamiento por digestión anaerobia de la porquinaza generada en la granja de cerdos pre cebo de Supercerdo S.A.	99

Bibliografía 102

Lista de figuras

Figura 1. Red de interacciones que conducen a la degradación progresiva de las moléculas orgánicas complejas hasta CH ₄ , CO ₂ y trazas de H ₂ S en un reactor UASB. A: Bacterias hidrolíticas/Fermentativas. B: Bacterias obligadas productoras de hidrógeno. C: Bacterias Homoacetogénicas. D: Metanógenos acetoclasticos [16].....	8
Figura 2. Representación esquemática del reactor UASB.	9
Figura 3. Reactor de película fija con flujo ascendente (FAFA).	10
Figura 4. Plan integral de nutrición para pastos, requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente, asociados a cada pastoreo.	16
Figura 5. Pasto estrella (<i>Cynodon nlemfuensis</i>)	17
Figura 6. Montaje del Potencial Bioquímico metanogénico para la evaluación de porquinaza.	21
Figura 7. Diagrama de la metodología de evaluación de impacto ambiental empleada para la implementación del sistema de recuperación energética y material de porquinaza [66].....	33
Figura 8. Rendimiento acumulativo de biogás y rendimiento acumulativo de metano en PBM de porquinaza.	35
Figura 9. Porcentaje de metano producido en el ensayo de PBM en el tiempo.	36
Figura 10. Reactor UASB empleado para el tratamiento de porquinaza.....	37
Figura 11. Reactor FAFA para el tratamiento de porquinaza tratada en un reactor UASB.	39
Figura 12. Modelo de la relación AGV/Alc y OLR con la DQO t ef.....	41
Figura 13. Modelo de la relación TRH (d) y la DQO t in (kg m ⁻³) sobre la DQO t ef.	42
Figura 14. Modelo de la relación entre AGV/Alc y DQO t in con la DQO t ef.	43
Figura 15. Modelo de la relación entre AGV/Alc y OLR con el porcentaje de remoción.	43
Figura 16. Producción de biogás y metano asociado a los diferentes rangos de materia orgánica. Rango 1: 3,982 – 6,6 kg L ⁻¹ . Rango 2: 7,825 – 10,759 Kg L ⁻¹ . Rango 3: 13,131 – 15,543 Kg L ⁻¹ . Rango 4: 18,456 – 19,983 Kg L ⁻¹ . Rango 5: 22,5 – 23,872 Kg L ⁻¹ . Rango 6: 28,743 – 30,169 Kg L ⁻¹	45
Figura 17. Modelos del rendimiento de biogás y metano respecto al volumen del reactor en relación con el porcentaje de remoción y la relación AGV/Alc del reactor.	47
Figura 18. Modelo que relaciona caudal y DQO t in con la DQO t ef.....	51
Figura 19. Relación entre AGV/Alc y DQO t ef.	51
Figura 20. Relación OLR y porcentaje de remoción.	52

Figura 21. Comportamiento de la relación AGV/Alc durante la digestión anaerobia en el FAFA.....	54
Figura 22. Comportamiento de la remoción de materia orgánica en el sistema de tratamiento en serie UASB – FAFA.	56
Figura 23. Relación de la producción de biogás y metano asociado a los días de digestión del sistema de tratamiento en serie UASB – FAFA.	56
Figura 24. Resultados de cada uno de los tratamientos T1: Efluente T2: Influyente. T3: Blanco, sobre cada una de las variables en pasto, a: Materia Húmeda, b: Nitrógeno, c: Fosforo, d: Potasio.	61
Figura 25. Gráfico de cajas y bigotes para determinar la diferencia de la concentración de nitrógeno entre tratamientos.....	64
Figura 29. Diagrama de la planta para la recuperación energética y material de porquinaza en la granja de cerdos pre cebo de la empresa Supercerdo S.A. (Línea azul continua: Fluido líquido. Línea verde discontinua: Biogás. Línea gris punteado: By pass)	69
Figura 30. Sitio para la instalación del sistema de recuperación energética y material de porquinaza en la granja de cerdos pre cebo de la empresa Supercerdo S.A (Tomado de: Google Maps).....	71
Figura 31. Identificación de las actividades asociadas a cada una de las fases del proyecto.	73
Figura 32. Entradas y salidas del sistema de producción porcícola de cerdos pre cebos.	79
Figura 33. Ubicación general de la granja y su cercanía con vías de acceso principales.	80
Figura 34. Granja de explotación porcina de cerdos pre cebos.	81
Figura 35. Estercolera con una capacidad de 15 m ³ para la recolección de la porquinaza generada en el sistema y bomba para el riego de la porquinaza.	82
Figura 36. Entradas y salidas del manejo de la porquinaza en la granja de cerdos pre cebos.	82
Figura 37. Matriz de identificación causa efecto de la producción porcícola.	83

Lista de tablas

Tabla 1. Composición promedio de la porquinaza cruda y del efluente de la digestión anaerobia [50]	13
Tabla 2. Caracterización del lodo anaerobio procedente del estiércol porcino [29]	14
Tabla 3. Ecuaciones de diseño para el sistema de tratamiento por digestión anaerobia de la porquinaza.....	23
Tabla 4. Diseño experimental para evaluación del potencial de fertilización del efluente del sistema de tratamiento anaerobio de porquinaza en la producción de pasto.	29
Tabla 5. Dosis de efluente e influente aplicadas en las parcelas con el tratamiento 1 (Efluente) y tratamiento 2 (Influente).	30
Tabla 6. Atributos para la valoración de impactos ambientales por la metodología Conesa Fernández. [66]	32
Tabla 7. Características fisicoquímica de la porquinaza, producto del muestreo continuo durante una semana.....	34
Tabla 8. Características de diseño del reactor UASB.....	38
Tabla 9. Características de diseño del reactor FAFA para el tratamiento de porquinaza.....	38
Tabla 10. Condiciones de operación promedio del reactor UASB usado para el tratamiento de porquinaza.	39
Tabla 11. Condiciones de operación estable del reactor UASB usado para el tratamiento de porquinaza.	48
Tabla 12. Rendimientos del reactor UASB bajo condiciones de operación estable.	49
Tabla 13. Condiciones de operación promedio del reactor FAFA para el tratamiento del efluente del reactor UASB.	49
Tabla 14. Parámetros de operación que favorecen el funcionamiento del reactor FAFA.....	54
Tabla 15. Eficiencias más altas presentadas por el reactor FAFA.....	54
Tabla 16. Comparación de la concentración de potasio total, carbono orgánico oxidable, fósforo total, nitrógeno total y relación C/N del influente y el efluente del sistema. (^a Las variables fisicoquímicas se realizan sobre base seca).....	57
Tabla 17. Características microbiológicas del influente, efluente y lodos de la digestión anaerobia de porquinaza.	59
Tabla 18. Características del suelo empleado para el ensayo.....	60
Tabla 19. Resultados del ANOVA para evaluar las diferencias estadísticamente significativas de cada una de las variables entre los tratamientos.	63
Tabla 20. Características de los reactores UASB a ser empleados en la granja de cerdos pre cebos de Supercerdo S.A.....	66

Tabla 21. Características del reactor FAFA a ser empleado en la granja de cerdos pre cebos de Supercerdo S.A.	67
Tabla 22. Tabla resumen de la normatividad que se debe considerar para el montaje de una porcicola.	77
Tabla 23. Factores impactados por la implementación del sistema de tratamiento.....	86
Tabla 24. Actividades impactantes de la implementación del sistema de tratamiento.....	88

1.Introducción

1.1 Formulación del problema.

La industria porcícola en Colombia luego de la década del 80 paso de ser una producción dependiente del suelo a un proceso intensivo y tecnificado con tendencias de crecimiento exponencial en el número de animales por sistema productivo.

Uno de los principales residuos asociados a la porcicultura es la porquinaza, la cual es generada en grandes volúmenes y tiene características fisicoquímicas y microbiológicas que dificultan su manejo, pero dada la alta concentración de materia orgánica y nitrógeno es usada para la fertilización de pastizales y consecuente alimentación de ganado, por esta razón en departamentos como Antioquia es común encontrar sistemas productivos acoplados cerdos – pasto – leche. Sin embargo, la porquinaza fresca al ser un residuo no estabilizado, genera impactos ambientales negativos sobre el aire: contaminación por amoníaco, metano y generación de olores; sobre el suelo: erosión, contaminación, y afectación sobre las características físicas y químicas; sobre el agua: uso, contaminación de fuentes superficiales y subterránea; y afectaciones sobre el paisaje [1].

Frente a la magnitud de la problemática y la necesidad de generar opciones de tratamiento económicas y eficientes en cuanto a la reducción de la carga contaminante y la generación de otros productos con valor comercial, el grupo de investigación GIEM ha venido desarrollando una estrategia enmarcada en la recuperación energética – producción de biogás – y la recuperación material – formulación de fertilizantes – evaluada en diferentes sustratos. El proceso incluye una primera fase de digestión anaerobia, y una segunda de formulación de fertilizantes órgano-minerales a partir del efluente generado en la primera, esto se configura como la mineralización de la materia

orgánica, el cierre de ciclos biogeoquímicos y la aceleración del retorno de moléculas y elementos orgánicos al suelo.

Con base en lo anterior y en la experiencia con la aplicación de esta estrategia de tratamiento, se consideró la evaluación de la recuperación energética y material de la porquinaza en el Norte de Antioquia, al ser una de las principales regiones del país en concentración de sistemas de producción porcícola y prácticas de riego con porquinaza, generando la siguiente pregunta de investigación, en cuya respuesta se basó el desarrollo de la presente tesis ¿Qué sistemas y etapas de tratamiento son los adecuados para la mitigación de impactos ambientales, generación de subproductos con valor comercial y ventajas económicas de montaje y operación para el tratamiento de la porquinaza?

1.2 Justificación.

Entre los residuos que se producen en los sistemas porcícolas, la porquinaza es el de mayor controversia debido al volumen y a las características fisicoquímicas del mismo que en últimas dificultan el manejo. Habitualmente, la porquinaza ha sido usada como un fertilizante de suelos para el crecimiento de pastos destinados a la ganadería lechera; este residuo posee unas características en cuanto a materia orgánica disponible y concentración de nitrógeno que favorecen la fertilización, pero la aplicación excesiva genera una serie de impactos ambientales negativos sobre el medio físico, biótico y social [3].

El tratamiento de la porquinaza es estratégico ya que el alto contenido de materia orgánica y compuestos nitrogenados se traduce en beneficios económicos y ambientales por lo que es necesario proponer y evaluar alternativas para la estabilización y recuperación, una de estas es la digestión anaerobia la cual constituye una opción para la estabilización y tratamiento ya que potencia el manejo del excedente de nitrógeno a un bajo costo, reduce las emisiones de dióxido de carbono al ambiente y desde un punto de vista energético es altamente deseable para la producción de energías renovables tales como la calórica, lumínica y eléctrica a partir del biogás, en el caso de la porquinaza esto ha sido evaluado empleando reactores de diferente naturaleza tales como el UASB, APB

[4], UASB híbrido con FA [6], ABR [7], UASB – AS [8], SCFBR [9], CSTR [10], entre otros.

Adicionalmente el efluente y el lodo de la digestión anaerobia pueden ser empleados como abono orgánico debido a su concentración de nutrientes, lo que desde el punto de vista ambiental representa una ventaja ya que el reciclaje de los residuos de materia orgánica ayuda al mantenimiento de los niveles de nutrientes del suelo, estimulando varios aspectos de la fertilidad del mismo y acelera el retorno de estos al suelo, y económicamente permite un ahorro al reducir el uso de fertilizantes químicos convencionales sin disminuir la productividad de los cultivos [11, 12, 13].

Por lo tanto, los sistemas de producción agropecuarios pueden ser orientados como producciones sostenibles con el objetivo de reducir muchos de los efectos negativos sobre el medio ambiente, alcanzando en el balance general del sistema una reducción en el consumo de fertilizantes y de energía, haciendo de esta industria un ejemplo de sostenibilidad para las producciones pecuarias en Colombia.

2. Hipótesis y objetivos.

2.1 Hipótesis.

La recuperación energética y material a partir de porquinaza empleando un sistema de tratamiento de digestión anaerobia operado bajo las condiciones óptimas de carga orgánica, hidráulica y estabilidad, permite la reducción en la carga orgánica, una óptima producción de metano y un efluente con alta calidad fertilizante, reduciendo significativamente los impactos ambientales asociados a este residuo.

2.2 Objetivos.

2.2.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar un sistema para la recuperación energética y material de la porquinaza y formular insumos para el sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia.

2.2.2 Objetivos específicos.

- Evaluar el rendimiento de recuperación energética en términos de reducción de carga orgánica y producción de metano a partir de un sistema de reactores en serie e híbridos.
- Formular un fertilizante líquido a partir del efluente y un fertilizante sólido a partir de los lodos producidos en el tratamiento anaerobio de la porquinaza.
- Evaluar el potencial fertilizante de las formulaciones en suelos de explotación de ganado lechero.
- Evaluar el impacto ambiental de la aplicación de este sistema de tratamiento en producciones porcícolas.

3. Marco de referencia.

3.1 Recuperación energética de porquinaza en un sistema productivo en el Norte de Antioquia.

Las excretas porcinas contienen una alta cantidad de nutrientes que los cultivos pueden utilizar por su potencial fertilizante, pero al tiempo la concentración de microorganismos patógenos es lo suficientemente alta como para considerarse un riesgo potencial sobre la salud de animales y humanos, además de las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal; dadas las características de este residuo, por su potencial biodegradable y por la inestabilidad en un ambiente natural, es necesario aplicar procesos de estabilización como la digestión anaerobia [2] y como fue demostrado por Tambone F et al 2010 [33], el potencial fertilizante incrementa cuando son aplicados procesos de estabilización/mineralización de la materia orgánica como lo es la digestión anaerobia. Esta tecnología sostenible contribuye a integrar el manejo de la materia orgánica, en el caso del estiércol se obtiene biocombustible (biogás), un efluente (digestato) rico en nitrógeno (N) y un lodo – biosólido – que pueden ser usados para mejorar el crecimiento y la calidad nutricional de cultivos, mientras se reduce la necesidad de fertilizantes inorgánicos.

En cuanto a la digestión anaerobia, los residuos de porquerizas son reconocidos por ser ricos en materia orgánica, nitrógeno y fósforo, además la fracción orgánica está constituida por proteínas, lípidos y celulosa. De acuerdo a las características de biodegradabilidad y a los altos volúmenes generados, la digestión anaerobia puede ser considerada como uno de los tratamientos alternativos más prometedores para convertirla en un subproducto con valor comercial [18, 30, 31]. Su procesamiento puede ayudar a los agricultores a manejar efectivamente la carga de nitrógeno (N), aunque el

tratamiento por digestión anaerobia puede ser conveniente desde el punto de vista energético y los ingresos adicionales para el productor [32]

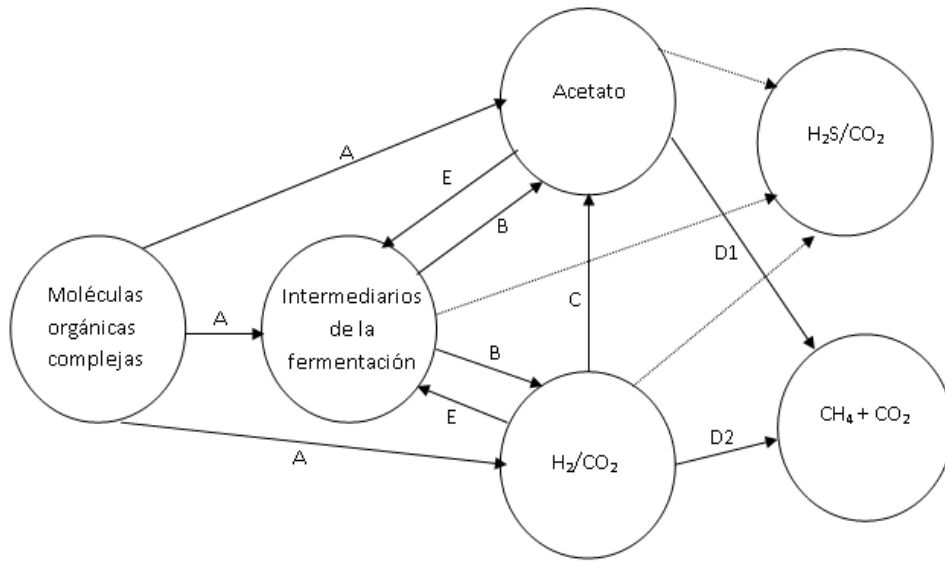
3.1.1 Proceso de digestión anaerobia: Un breve resumen

La digestión anaerobia ha sido reconocida desde hace muchos años como un proceso eficiente de recuperación energética a partir de aguas residuales por la producción de biogás asociada, pero los esfuerzos de la investigación sobre esta tecnología y otras energías alternativas adquirió gran importancia para el mundo científico luego de la crisis de los combustibles y el deterioro en la calidad ambiental [14, 15]

La digestión anaerobia es considerada como un sistema bifásico compuesto por una fase no metanogénica y otra metanogénica. En la primera las bacterias anaerobias conducen procesos de fermentación para la transformación de los sustratos en compuestos solubles como acetatos ($C_2H_3O_2R$), dióxido de carbono (CO_2) e hidrogeno (H_2), los cuales son usados en una segunda fase por las bacterias metanogénas hasta metano (CH_4).

La red de interacción que ocurre en el proceso de digestión anaerobia y la microflora asociada son presentadas en la Figura 1. La digestión es iniciada con el paso de la hidrólisis; esta involucra un amplio rango de procesos de despolimerización y solubilización mediados por bacterias fermentativas obligadas y bacterias facultativas las cuales facilitan la hidrólisis de las proteínas y polisacáridos, incluyendo la materia orgánica suspendida en el agua residual, hasta azúcares monomericos, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y alcoholes. En el próximo paso – acidogenesis – además de la fermentación de los productos monomericos mediados por estas bacterias y otras fermentativas no hidrolíticas en la que se genera ácidos grasos de cadena corta, hidrogeno y dióxido de carbono, se da la generación de acetato, hidrogeno y dióxido de carbono, en un paso llamado acetogenesis. Esto es llevado a cabo por acetogenos obligados productores de hidrógeno (OHPAs). Estos microorganismos sirven como el enlace entre las etapas iniciales de la fermentación y la fase metanogénica final. Los Metanogenos son anaerobios estrictos, pueden ser hidrogenofilicos o hidrogenotrofos los cuales forman metano por la reducción de H_2/CO_2 o especies acetoclasticas o acetotrofos que generan metano por la descarboxilación del acetato [16].

Figura 1. Red de interacciones que conducen a la degradación progresiva de las moléculas orgánicas complejas hasta CH_4 , CO_2 y trazas de H_2S en un reactor UASB. A: Bacterias hidrolíticas/Fermentativas. B: Bacterias obligadas productoras de hidrógeno. C: Bacterias Homoacetogénicas. D: Metanógenos acetoclasticos [16]



3.1.2 Parámetros para la selección de un sistema de digestión anaerobia.

De acuerdo al tipo de residuos – características fisicoquímicas, concentración de sólidos, humedad, entre otros – y a los objetivos que se tengan con el sistema – alta remoción de materia orgánica, estabilización del residuo, obtención de energía o fertilizantes – se selecciona el sistema de digestión anaerobia.

Los digestores de alta tasa tienen el potencial de tratar las aguas residuales eficientemente y a la vez capturar el metano para el uso como una fuente de energía relativamente limpia y parámetros operacionales tales como tiempo de retención hidráulica (TRH), mezcla, números de tanques y temperatura, junto con las propiedades del sustrato, son la base para la selección y el diseño de un digestor. [17].

- Reactores de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB)

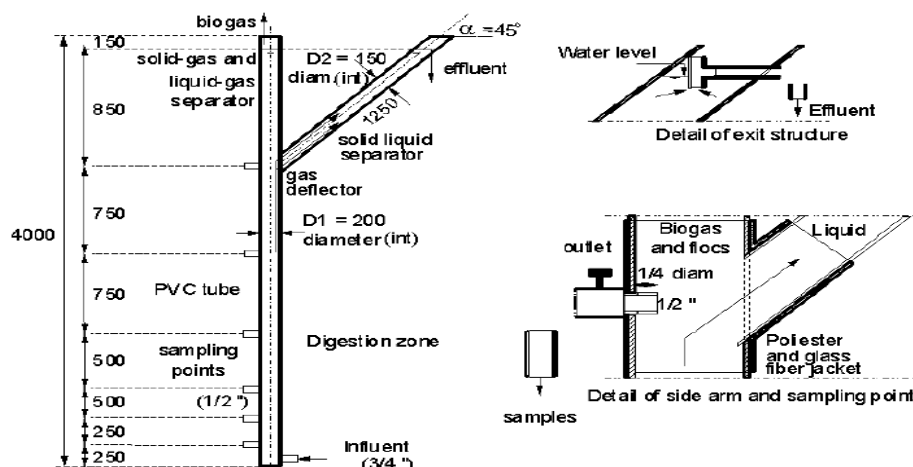
Las dos principales condiciones para un buen rendimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales son: (1) Asegurar un buen contacto entre el sustrato de entrada y el lodo y (2) mantener retenida la biomasa en el sistema. Los reactores UASB son una

tecnología simple para el tratamiento de aguas residuales y es la más aplicada para el tratamiento de efluentes con altas cargas orgánicas [12, 18].

Un reactor UASB consiste principalmente de tres secciones a través de las cuales el agua residual fluye en sentido ascendente, estas son: zona de digestión, zona de fluidificación y separador gas – líquido – sólido, esta última es representativa de este tipo de reactor, en esta, el gas producido y el lodo impulsado por las burbujas de gas atrapadas o fijadas son separados del efluente [15, 19]. Una de las características del reactor UASB es el lodo granular que aumenta el rendimiento en términos de remoción de la carga orgánica y producción de biogás, pero su formación requiere de un largo y cuidadoso periodo de arranque [20]. De acuerdo a lo expresado por el inventor de los reactores UASB, Lettinga, los gránulos anaerobios son partículas envueltas por una biopelícula, la cual se forma espontáneamente en el reactor por la auto-inmovilización de las bacterias anaerobias ya que estas forman consorcios microbianos para la sinergia en el crecimiento y flujo de nutrientes [21].

Aunque la eficiencia de usar un reactor UASB para la remoción de materia orgánica ha sido ampliamente demostrada, el rendimiento de este reactor puede ser mejorado por la innovación en el diseño y en la operación. Cavalcanti P., et al, 1999 [22] demostró que una mayor eficiencia en la remoción de Sólidos Suspendidos (SS) y materia orgánica puede ser obtenida si el tiempo de retención de lodos es maximizado con un separador de fases más eficiente y aplicando una estrategia adecuada de descarga del exceso de lodos [23]. En la Figura 2 se observa la representación esquemática del reactor UASB usado por Cavalcanti P., et al (1999) [22]

Figura 2. Representación esquemática del reactor UASB.

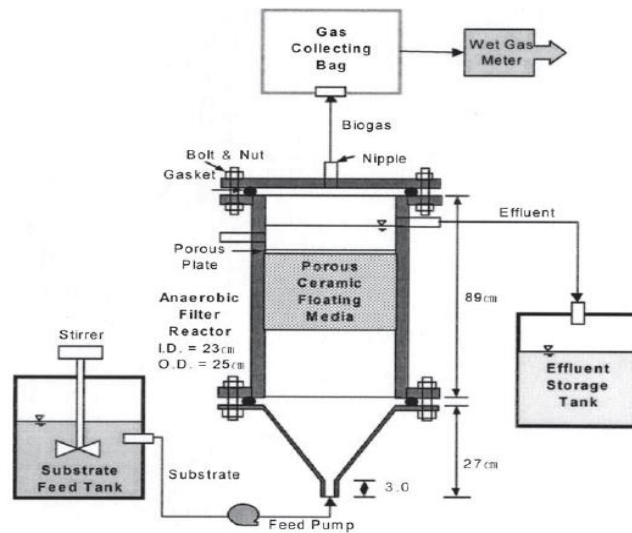


- Reactores de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

Los reactores de lecho fijo ofrecen una alternativa para aumentar el tiempo de residencia celular dentro del reactor y reducir el TRH para la remoción de carga orgánica y la producción de metano. Estos reactores están empacados con un medio inerte que provee una alta área superficial para el crecimiento microbiano, el influente pasa a través del medio y los microorganismos se adhieren al soporte creando una delgada capa de bacterias anaerobias llamada biopelícula, continúan el crecimiento y remueven el material a partir del agua residual en la medida que este fluye [4, 24, 25].

Las zonas funcionales de este tipo de reactores son: zona de entrada, zona empacada y zona de salida. La zona empacada, ocupa entre el 50% al 70% de la altura del reactor. El residuo fluye en forma ascendente a través del lecho y su comportamiento hidráulico obedece a un flujo pistón ocasionado principalmente por el flujo ascendente del gas producido en el reactor, facilitando la degradación y evitando el bloqueo por la acumulación de sólidos entre el material de soporte. [20, 26]. En la Figura 3 se presenta el modelo general de un reactor FAFA [27].

Figura 3. Reactor de película fija con flujo ascendente (FAFA).



3.1.3 Principales parámetros de diseño de un proceso de digestión anaerobia.

Los parámetros relevantes para el diseño de un proceso de digestión anaerobia son los presentados por Kashyap D.R., et al 2003 [28], estos consideran el funcionamiento hidráulico y de carga orgánica que se deben considerar para planear desde el diseño el funcionamiento correcto de los sistemas de tratamientos por este método.

- Tasa de carga orgánica (OLR) y remoción de DQO: Es un parámetro que afecta significativamente la ecología microbiana y el rendimiento del sistema de digestión anaerobia. Este parámetro integra las características operacionales y la actividad bacteriana dentro del reactor.
- Tasa de flujo (Q) y tiempo de retención hidráulica (TRH): Es el volumen de influente aplicado por unidad de tiempo en un determinado periodo. Este parámetro puede ser definido a partir de la cantidad de residuos que se desean tratar y a partir de ahí definir el volumen del reactor. La altura (H) y el diámetro (d), deben obedecer a una relación en la cual el diámetro es equivalente a 0.1 – 0.3 de H. Reactores altos fomentan el contacto entre el sustrato y los microorganismos, lo cual resulta en una mayor conversión de la materia orgánica en biogás. El TRH, depende de la temperatura.
- Velocidad ascensional (V_{up}): Este mantiene la mezcla y TRH del sustrato y la biomasa. La velocidad de flujo del influente es directamente proporcional a la altura del reactor e inversamente proporcional al tiempo de retención hidráulica.
- pH: La comunidad microbiana del reactor anaerobio es sensible a cambios del pH y las bacterias metanogénicas son afectadas en una mayor proporción. Un óptimo pH para el crecimiento microbiano es de 6.5 a 7.5, el pH no debe caer por debajo de 6.2 ya que limita las funciones de las bacterias metanogénicas. Para asegurar esto, la alcalinidad por bicarbonato debe permanecer en el rango de 2500 – 5000 mg L⁻¹. La capacidad buffer resultante es adecuada para manejar el impacto de la formación de ácidos grasos volátiles.

- Temperatura de operación: Las bacterias mesófilas completan su crecimiento entre 15 y 40°C con una temperatura óptima de 35°C.
- Hermetismo: El reactor debe estar herméticamente cerrado, de modo que se garanticen las condiciones anaerobias.

Para el diseño de un filtro anaerobio son consideradas adicionalmente los siguientes parámetros, los cuales rigen la operación y funcionamiento:

- Porosidad: El uso de un material de soporte con una alta porosidad potencia el rendimiento del filtro anaerobio ya que esto se asocia con la cantidad de biomasa suspendida que este puede retener. Es la fracción del volumen de una muestra que es ocupada por poro o espacio vacío.
- Área superficial específica de la matriz: Mientras más grande sea, el tiempo para el arranque es más bajo y un buen rendimiento del reactor es alcanzado.

3.2 Recuperación material de porquinaza en un sistema productivo en el Norte de Antioquia.

El suelo es un recurso natural que a lo largo de la historia ha proporcionado el sustento para la vida; sin embargo, el crecimiento demográfico y la demanda de alimentos aumentan cada día más la presión sobre este recurso. Es importante adoptar alternativas agroecológicas para acometer de forma gradual acciones que minimicen y brinden soluciones a corto, mediano y largo plazo, no obstante estas alternativas deben ser planteadas con un enfoque sistémico e integrador y no como una solución aislada, pues se concatenan factores naturales y antrópicos. Por ello un manejo integrado de los suelos llamado también manejo ecológico o sostenible, resulta de vital importancia para potenciar su capacidad productiva en beneficio del hombre.

Entre las acciones para proteger los ecosistemas agropecuarios y prevenir su degradación, la aplicación de abonos orgánicos tiene una importancia significativa, pues resulta insoslayable que la materia orgánica, y particularmente el humus, son el sostén básico para la vida en este medio y puede definir su potencial productivo. Una práctica

muy conocida y aplicada en el mundo entero es el uso de estiércol de diversos animales para restituir los nutrientes al suelo. Estos tienen la ventaja que además de restituir los elementos mayores, aportan otros que han sido exportados del campo y enriquecen el suelo con materia orgánica, tan necesaria para mantener su fertilidad. [19, 29].

3.2.1 Efluente de la digestión anaerobia

Los beneficios de usar el digerido del estiércol como fertilizante de cultivos y no el estiércol crudo se centra en la reducción de impactos ambientales y en el fortalecimiento del potencial fertilizante ya que: (1) Se logra una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero como el CH₄ y el CO₂ ya que son capturados en el proceso de digestión anaerobia, (2) El nitrógeno y el fósforo son generalmente conservados durante la digestión anaerobia, la fracción mineralizable de ambos nutrientes incrementa y la pérdida de viscosidad mejora la infiltración bajo la superficie del suelo, (3) Reducción en la relación C/N pasando de 17.0 en el estiércol a 10.5 en el efluente, reduciendo la inmovilización del N por los microorganismos del suelo e incrementando la mineralización y disponibilidad para los cultivos luego de la aplicación, (4) Decrecimiento en la pérdida de N por desnitrificación y de las emisiones NH₃ debido al incremento en la infiltración dentro de la superficie del suelo en comparación con la aplicación del estiércol crudo [33, 47]. En la Tabla 1 se presenta la composición promedio de la porquinaza cruda y del efluente de la digestión anaerobia [50].

Tabla 1. Composición promedio de la porquinaza cruda y del efluente de la digestión anaerobia [50]

Características	Estiércol crudo	Efluente de la digestión anaerobia del estiércol
Sólidos totales (mg L ⁻¹)	11250	1200
P total (mg L ⁻¹)	660	780
TKN (mg L ⁻¹)	2880	2660
NH ₄ – N (mg L ⁻¹)	1440	1500
K total (mg L ⁻¹)	1170	1120
DQO (mg L ⁻¹)	12600	5600
pH	7.8	8.1

La dosis por aplicar del efluente depende de su composición, del tipo de suelo y de las necesidades del cultivo. Por este motivo, es conveniente efectuar un análisis químico del efluente para establecer sus propiedades fertilizantes, además de la carga microbiana del mismo [11].

Estudios realizados por Loria E.R., et al (2005) [50] en el cual se evalúa el fósforo (P) y el nitrógeno inorgánico (N) extractable del suelo, comparando la aplicación del efluente de la porquinaza tratada mediante digestión anaerobia, el estiércol crudo y la fertilización inorgánica, en un ensayo de incubación durante 112 días, encontró que el estiércol fresco y el digerido de la misma presentan desaparición de NH_4^+ - N, formación de NO_3^- - N y de N inorgánico neto e incremento en del P en el suelo muy similares; en este estudio se concluye que la digestión anaerobia no afecta sustancialmente los nutrientes disponibles y puede proveer una similar disponibilidad de N y P para las plantas en comparación con el estiércol crudo.

3.2.2 Lodos de la digestión anaerobia

El lodo es uno de los productos finales del tratamiento por digestión anaerobia. Usualmente este es compostado y complementado con fertilizantes químicos, obteniendo un producto final con altos contenidos de materia orgánica (>20%) y es rico en N y P que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Potasio (K) y micronutrientes tales como zinc (Zn), cobre (Cu) y hierro (Fe) están también presentes en niveles relativamente altos [13]. En la Tabla 2 se presenta la caracterización del lodo procedente de la digestión anaerobia de la porquinaza [29].

Tabla 2. Caracterización del lodo anaerobio procedente del estiércol porcino [29]

Nitrógeno	3.9 %
Fósforo	1.3 %
Potasio	0.6 %
Materia orgánica	77.5 %
Carbono	44.9 %
C/N	11.4
Proteínas	24.6 %
pH	7.0

Se ha demostrado que los suelos con menos contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, contenido de bases y micro elementos son favorecidos por la aplicación de los lodos cuando se logra un alto grado de descomposición de la materia orgánica hasta llegar a la estabilización biológica, y el riesgo de lixiviación de nitratos es bajo cuando se aplican en dosis que igualan las demandas de nitrógeno por parte de las plantaciones [49].

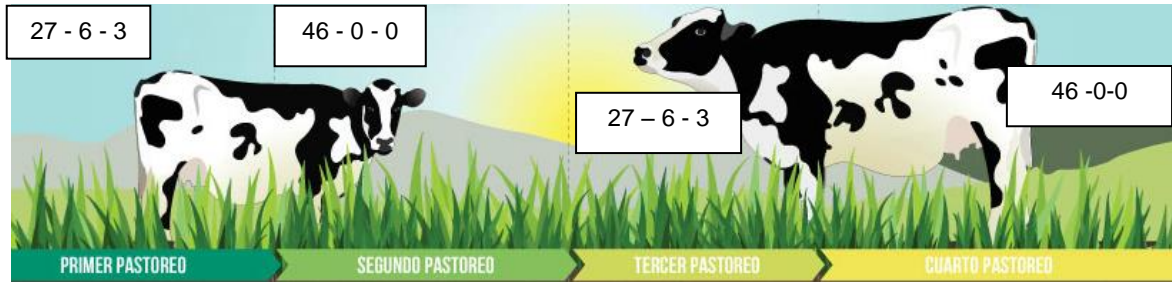
Cheng H., et al 2007 [49] evaluó los impactos de la aplicación de un lodo compostado sobre la calidad del suelo y el cultivo de un pasto *Perennial ryegrass*, hallando que mezclas con un contenido de lodo superior al 70% inhiben los rendimientos en el crecimiento de la planta, los resultados indican que el mejor crecimiento en las fases iniciales se da en el suelo con una mezcla del 5% del lodo compostado, mientras en el largo plazo el crecimiento fue mejor con mezclas de 10 – 20% del lodo. Esto es atribuido a la liberación gradual de nutrientes, especialmente nitrógeno, en suelos enmendados con bajos niveles de lodo compostado. El contenido de clorofila, nitrógeno y fósforo en el pasto cultivado en suelos enmendados con 5% - 20% incrementa continuamente a lo largo de los procesos de corte, indicando las ventajas del lodo compostado como un fertilizante de liberación lenta. El contenido de K fue significativamente bajo, probablemente porque la mayoría del K en el lodo compostado es asociado con la materia orgánica y se presenta en una forma de liberación rápida. Por lo tanto la adición de K como fertilizante puede ser necesaria.

3.2.3 Requerimientos nutricionales de los cultivos

El nitrógeno (N) es un componente integral en las plantas, principalmente en las proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. El fósforo y el potasio también tiene un importante rol en el crecimiento. El fósforo es el segundo elemento más importante para el crecimiento de la planta y es un componente esencial de las moléculas orgánicas incluyendo en el adenosin trifosfato (ATP), ácido desoxiribonucleico (ADN), ácido ribonucleico (ARN) y fosfolípidos. El potasio es el tercero más importante, este limita la productividad de las plantas y está directamente involucrado en el mantenimiento de la humedad, la presión de turgencia de las células y en la apertura y cierre de estomas. La adición de materia orgánica N, P y K, puede también reducir la densidad del suelo e incrementar la tasa de infiltración y la capacidad de retención de nutrientes del suelo [49].

En la Figura 4 se presenta el plan integral de nutrición para pastos para ganado lechero [34]

Figura 4. Plan integral de nutrición para pastos, requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente, asociados a cada pastoreo.



3.2.4 *Cynodon nlemfuensis* (Pasto Estrella, Tumba viejos) [52]

Originaria del Este de África, adaptada a trópicos o subtrópicos. Estolonífera y rizomatosa, de raíces profundas. Estolones leñosos, tallos de 40 cm de alto y de 1 a 1.5 mm de diámetro cerca de la base. Hojas lanceoladas, exfoliadas, de 3 a 30 cm de larga, 2 a 5 mm de ancho. Inflorescencia en panícula digitada o sub digitada, 3 a 9 racimos parecidos a espiga de 3 a 5.7 cm de largo, espiguillas verdes, rojas o purpuras de 2 a 3 mm de largo. Su crecimiento y floración responde a días cortos. **Figura 5**

Se adapta a suelos arenosos hasta arcillas pesadas, óptimo en suelos de textura ligera bien drenada, no tolera encharcamiento prolongado, pH entre 5.5 y 8.0, tolera salinidad y calor. En cuanto a luz, el óptimo es a libre exposición o sombra ligera. Altitud, 0 – 1800 msnm, temperatura de 17 a 27°C, precipitación de 800 a 2800 mm. Tolerancia a sequía. Es susceptible a roya y mancha de la hoja. Establecimiento como cobertura para el control de malezas y conservación de suelos. Ideal para pastoreo o ensilaje. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Disminución de la densidad aparente, disminución de la resistencia mecánica a la penetración y aumento de la infiltración básica de agua en el suelo. A 21 días de edad, sin fertilización, la proteína cruda puede ser de 13.86%, FND de 65.64%, FDA de 39.86%, 2.08 Mcal de energía metabolizable y 57.9% de digestibilidad.

Potencial de Producción:

- Forraje: Con 21 días de edad, 46 kg de N y con riego, puede alcanzar un rendimiento de materia seca de 2270 kg ha⁻¹, es decir, puede producir 39 ton MS ha⁻¹ año⁻¹.
- Animal: Utilizado en sistemas intensivos, en rotación con 21 días de descanso y carga de 1500 kg ha⁻¹, la producción de carne fue de 3.34 kg día⁻¹ es decir 1.2 ton de carne ha⁻¹ año⁻¹.

El manejo de esta planta requiere fertilización alta (kg del elemento ha⁻¹). N: 70, P₂O₅: 57.25, K₂O: 24, MgO: 33, SO₄: 59.8. Pastoreo rotacional, responde bien a fertilización nitrogenada en condiciones húmedas.

Figura 5. Pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*)



2.3. Evaluación de los impactos ambientales de la recuperación energética y material de la porquinaza.

Incluir el aspecto ambiental en el proceso productivo contribuye al bienestar humano y animal, considerando la inocuidad, seguridad alimentaria, trazabilidad y la salud pública, por ello, utilizar tecnologías sostenibles para controlar y minimizar la contaminación ambiental ya es una prioridad para el porcicultor, a fin de demostrar que se puede producir con eficiencia y eficacia protegiendo el ambiente [53].

En las explotaciones porcinas es importante la implementación de alternativas que conduzcan a la producción más limpia y por lo tanto a una sostenibilidad ambiental. El tratamiento anaerobio de porquinaza se presenta como una alternativa muy atractiva para el aprovechamiento de este tipo de residuos tan contaminantes, presentando una

gran cantidad de ventajas para el sector porcícola; sin embargo, se hace necesaria la consideración del tipo de impactos que causaría la implementación de esta tecnología, con el fin de buscar un equilibrio entre el desarrollo de esta actividad y el medio ambiente [59].

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso destinado a mejorar el sistema de toma de decisiones, y está orientado a garantizar que las opciones de proyectos en consideración, sean ambiental y socialmente sostenibles. Se entiende como EIA el conjunto de estudios y sistemas técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de un determinado proyecto, obra o actividad causa sobre el medio ambiente.

La identificación y evaluación de impactos ambientales permite comparar las situaciones existentes con aquellas que surgirían como resultado del desarrollo de una acción en particular. La comparación sirve para identificar tanto los impactos positivos y los beneficios ambientales que surgen de realizar el proyecto o actividad que se está evaluando, como aquellos de carácter negativo que deben manejarse para evitar la degradación del medio ambiente [56]. De acuerdo al Decreto 2820 de 2010, emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, impacto ambiental es “cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad” [57].

4. Metodología.

4.1 Recolección de la muestra.

La porquinaza empleada en la presente investigación fue obtenida en el sistema de producción porcícola de Supercerdo S.A ubicado en el corregimiento el Hatillo del municipio de Barbosa (ANT), en los galpones de cría de cerdos pre cebos. Se emplearon recipientes de 60 L los cuales fueron lavados con agua de la llave y antes de la recolección fueron enjuagados con la muestra. La porquinaza fue transportada al laboratorio bajo condiciones ambientales y fue procesada inmediatamente [4]. En la primera etapa – selección y diseño del sistema de tratamiento – se obtuvieron dos muestras por día durante una semana para definir las características orgánicas y los requerimientos de tratamiento. Para el arranque y operación del sistema, se obtuvo muestra fresca para el influente cada vez que fue necesario siguiendo el protocolo descrito anteriormente.

4.2 Caracterización de la porquinaza.

Un correcto pre tratamiento de la porquinaza, no solo para la caracterización, sino para posterior alimentación del reactor, involucro la separación de la fracción líquida de la sólida. La técnica aplicada fue el tamizado y la sedimentación, métodos que reducen la fracción insoluble y mantienen constante la fracción biodegradable [62]. La muestra fue pasada a través de una malla de 2 mm para remover materiales de gran tamaño como restos de alimentos, hojas, piedras, entre otras – fracción sólida – [63]. Durante una hora se dejó sedimentar la muestra y se empleó la porción superior para la caracterización y posterior alimentación al reactor [5].

La muestra empleada para el diseño del sistema fue procesada para el análisis de los siguientes parámetros: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), demanda química de

oxígeno (DQO) total y soluble, para estos se empleó la metodología propuesta por la APHA (2005) [35]; potasio total, nitrógeno orgánico total, siguiendo la metodología de la NTC 370 [36]; fósforo total por la metodología de la NTC 234 [37]; carbono orgánico total por la NTC 5167 [38] y DBO₅, estos análisis se realizaron por triplicado.

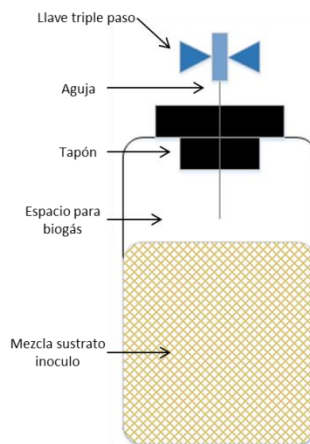
4.2.1 Potencial Bioquímico Metanogenico (PBM)

Estos ensayos fueron establecidos por Owen 1979 [41] como un procedimiento simple y económico para el monitoreo de la biodegradabilidad anaerobia de los sustratos [40]. A pesar de ser un sistema en batch, los resultados obtenidos pueden ofrecer una guía para el diseño, la ingeniería y el escalado de los sistemas de digestión anaerobia en operación continua y semi continua.

- Muestra de porquinaza: Fue recolectada bajo las mismas condiciones descritas anteriormente. El sistema fue cargado con una muestra compuesta de porquinaza recolectada en horas de la mañana y en horas de la tarde, y fue caracterizada para Sólidos Volátiles (SV) empleando la metodología descrita por la APHA (2005) [35].
- Inoculo: Se empleó lodo proveniente de un reactor anaerobio para el tratamiento de porquinaza a escala de laboratorio, y fue caracterizado para SV, además de ser sometido a incubación durante 10 días a 35°C para minimizar la producción endógena de metano. Se consideró que la microflora está adaptada a obtener alimento y energía a partir de este sustrato y que aporta los nutrientes necesarios para operar con éxito un PBM y por esto no se agregaron nutrientes adicionales al medio.
- Montaje y operación: Se aseguró que el sustrato estuviera libre de materiales de gran tamaño antes de realizar la mezcla con el inoculo. El ensayo se realizó por triplicado y los blancos por duplicado. A cada frasco de vidrio de 1 L se transfirieron 100 mL de inoculo y 400 mL de sustrato, por lo tanto el volumen libre para la cabeza de gas fue de 500 mL. Para los blancos se reemplazó el sustrato por agua de la llave reposada para retirar el cloro. Los frascos fueron llevados al

shaker durante 10 min para garantizar una mezcla homogénea. Luego fueron sellados empleando cauchos, tapas, silicona, teflón y cinta aislante. La tapa y el caucho de cada frasco fueron atravesados con una aguja y está a su vez, conectada a una llave triple paso para diálisis. Las botellas fueron llevadas al baño maría a 35°C durante dos horas y se liberó el biogás sin medirlo. Este tiempo es el inicial de la prueba. En la Figura 6 se presenta el diagrama del montaje del potencial metanogenico empleado.

Figura 6. Montaje del Potencial Bioquímico metanogenico para la evaluación de porquinaza.



La medición del volumen de biogás se realizó de forma indirecta empleando una manómetro para chequear la presión en el espacio de cabeza de los frascos y a partir de esta se calculó el volumen de biogás producido (P2). Inicialmente se midió diariamente, pero dependiendo de la cantidad de biogás producido estas son espaciadas cada tres días. La caracterización de la composición del biogás del espacio de cabeza se realizó empleando el medidor GeoTech Biogas 2000, el cual reporta valores de CH₄, CO₂, H₂S, O₂, H₂S y el balance de otros gases, al finalizar la caracterización se midió de nuevo la presión (P1). La prueba se dio por terminada cuando la producción de biogás cesó. Los valores reportados fueron el promedio de los ensayos.

- Metodología para cálculos del volumen de biogás.

La producción de biogás fue estimada diariamente mediante la medida de la presión en el espacio de cabeza de cada ensayo y entonces convertida a volumen por la aplicación de la ley de gases ideales.

$$PV = nRT \text{ (Ecuación 1)}$$

$$V_{biogas} = \frac{n_{biogas} * R * T_{amb}}{P_{amb}} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$n_{biogas} = \frac{P_{biogas} * V_{hs}}{R * T_r} \text{ (Ecuación 3)}$$

Reemplazando la ecuación 3 en la 2, se obtiene la ecuación para el cálculo del biogás en cada uno de los ensayos:

$$V_{biogas} = \frac{P_{biogas} * T_{amb} * V_{hs}}{P_{amb} * T_r} \text{ (Ecuación 4) [40]}$$

Donde V_{hs} es el volumen del espacio de cabeza (L); P_1 y P_2 , presión final e inicial respectivamente (KPa); T_{amb} es la temperatura ambiental (K); T_r es la temperatura del volumen del espacio de cabeza (K); P_{amb} es la presión ambiental. Esta ecuación fue aplicada para cada ensayo y por día se reportó el volumen de biogás promedio. Para el cálculo del volumen de metano se empleó la siguiente ecuación.

$$V_{metano} = V_{biogas} * \%CH_4 \text{ (Ecuación 5)}$$

Cuando los controles reportaron presión o metano, los valores de volumen de biogás fueron corregidos de la siguiente manera

$$V_{biogas} (ml) = V_{ensayo} (ml) - V_{control} \text{ (Ecuación 6)}$$

Para el reporte de los rendimientos de biogás y de metano, el valor de SV fue normalizado de acuerdo a la cantidad empleada en cada botella.

$$SV_{normalizados} (mg) = SV_{sustrato} \left(\frac{mg}{L} \right) * Vol \text{ de sustrato } (L) \text{ (Ecuación 7)}$$

El rendimiento de biogás y el rendimiento de metano fueron reportados como el promedio del volumen corregido producido en cada una de las réplicas, en relación con los $SV_{normalizados}$ del ensayo.

$$B_v \text{ Biogas} = \frac{V_{Biogas}}{SV_{normalizados}} \equiv \left[\frac{ml_{biogas}}{mg} \right] \text{ (Ecuación 8)}$$

$$B_v \text{ Metano} = \frac{V_{metano}}{SV_{normalizados}} \equiv \left[\frac{ml \text{ CH}_4}{mg} \right] \text{ (Ecuación 9)}$$

4.3 Diseño del sistema de digestión anaerobia.

De acuerdo a los resultados dados por la caracterización inicial de la porquinaza se realizó el diseño del reactor UASB, mientras el FAFA fue diseñado con las características fisicoquímicas esperadas del efluente estabilizado del reactor UASB. Para el diseño se emplearon los parámetros y ecuaciones presentados en la Tabla 3 [28], además de las relaciones reportadas por Cavalcanti P., et al (1999) [22]

Tabla 3. Ecuaciones de diseño para el sistema de tratamiento por digestión anaerobia de la porquinaza.

Tasa de carga orgánica (OLR) y remoción de DQO	$OLR = \frac{DQO_{in}}{TRH} \equiv \left[\frac{kg}{m^3 d} \right]$	(Ecuación 10)
Tasa de flujo (Q)	$Q = \frac{V}{TRH} \equiv \left[\frac{m^3}{d} \right]$	(Ecuación 11)
Volumen del reactor (V)	$V = TRH * Q \equiv [m^3]$	(Ecuación 12)
Velocidad ascensional (V_{up})	$V_{up} = \frac{h}{TRH} = \frac{Q}{A} \equiv \left[\frac{m}{h} \right]$	(Ecuación 13)
Área del reactor (A)	$A_R = \pi * \frac{D^2}{4} \equiv [m^2]$	(Ecuación 14)

Flujo másico	$F = V * OLR \equiv \left[\frac{Kg \ DQO}{d} \right]$ (Ecuación 15)
Porosidad del material de soporte (%)	$\varphi = \frac{\rho_m}{\rho_m + \frac{\rho_f}{\rho_m}}$ (Ecuación 16)

Adicionalmente es necesario considerar:

- Temperatura, la cual para este estudio estuvo en el rango mesofilo, los reactores fueron operados a temperatura ambiente, la cual oscilo entre 21°C a 29°C.
- Área superficial ($m^2 \ m^{-3}$) para el FAFA: se empleó espuma de poliuretano dispuesta en forma de cilindros al azar, para el cálculo, en un recipiente de 6 L se disponen los cilindros definiendo la cantidad correspondiente a ese volumen. Para calcular el área del material se consideró que el área expuesta que ofrece para el desarrollo de una biopelícula es el área de los lados del cilindro. Por lo tanto se calcula el área superficial considerando la fórmula para un cilindro. [27]

$$A = 2\pi * [h * (r_e - r_i) + (r_e^2 - r_i^2)] \text{ (Ecuación 17)}$$

Luego el área superficial específica es de:

$$A_{sup\ específica} = \frac{A * \text{Número de cilindros}}{6 L} \equiv \left[\frac{m^2}{m^3} \right] \text{ (Ecuación 18)}$$

4.4 Arranque del sistema de digestión anaerobia.

El arranque es comúnmente considerado la fase más inestable y crítica de la digestión anaerobia [42], este se realiza de forma independiente en cada reactor, por lo que el FAFA es arrancado luego de que el reactor UASB alcanza condiciones estables.

En el reactor UASB durante la fase de arranque se realiza un incremento gradual de las condiciones de operación como son la tasa de carga orgánica, la tasa de carga de lodo, el TRH, la V up, entre otros, para lograr la adaptación del inóculo al sustrato de interés, adicionalmente es posible lograr la granulación ya que es un proceso gradual y cuya

formación es esencial para la operación estable del sistema anaerobio [15, 21, 42, 44]. El arranque para el reactor UASB es planeado en varias etapas hasta alcanzar el estado estable, definido como la baja variación en el porcentaje de remoción y en porcentaje de metano, dado que no se monitorea la formación de lodo granular dentro del reactor.

1. El volumen útil del reactor fue cargado con lodo filamentoso proveniente de la Planta de Aguas residuales San Fernando mezclado con agua de grifo reposada en una proporción 50:50, esta mezcla antes de ser cargada al reactor fue filtrada empleando una malla con tamaño de poro de 2 mm. Esta mezcla fue caracterizada para ST y SV siguiendo la metodología descrita anteriormente.
2. Luego de 24 h se comenzó la alimentación con porquinaza con una OLR mínima de $1 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. En el momento en el que fue posible mantenerla, es decir, el reactor alcanzó un comportamiento estable bajo esas condiciones de operación, la primera fase del arranque se dio por terminada.
3. Se alimentó con un caudal constante evaluando las condiciones de estabilidad y respuesta al tratamiento, en la medida en la que el reactor muestra una buena operación se incrementó el caudal. Esto se realizó hasta que la producción de biogás y el porcentaje de remoción de la carga orgánica en el efluente no variaron significativamente. Cabe resaltar que en el periodo de arranque la medición de la producción de biogás es monitoreada más no considerada para establecer los rendimientos del reactor, ya que el arranque es un periodo de adaptación.

La porquinaza empleada como influente se alimentó al reactor con la misma DQO que llega de la estercolera – muestra puntual – es decir, este parámetro no fue controlado, ya que se busca que opere a condiciones reales de variación de carga orgánica del sistema productivo estudiando.

En el caso del FAFA este debe ser operado de una manera que optimice el periodo de arranque, el rápido crecimiento de la biopelícula y lograr una operación que permita evitar la limitación de la difusión y la formación de obstrucciones. El periodo de arranque puede ser reducido considerablemente mediante la aplicación de un corto periodo de

inoculación, por lo que el aumento de la velocidad de carga orgánica se puede lograr con un bajo TRH para favorecer el crecimiento de la biopelícula [64]. El arranque de este tipo de reactor incluyó dos pasos:

1. Periodo de inoculación, durante el cual el medio de soporte se encuentra en contacto cercano con el inoculo para comenzar la formación de la biopelícula. El Fafa es cargado con una mezcla 50:50 de inoculo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando y efluente del reactor UASB. Este periodo duro 24 horas [45].
2. El influente del Fafa fue el efluente del UASB, el cual fue recolectado en un tanque de alimentación para controlar los parámetros hidráulicos de operación de este. Empleando una bomba peristáltica se manejó un Q de 0,115 m³/d, con un TRH de 0,5 d. Es decir, no se empleó un incremento paulatino de la carga orgánica sino que fue sometido a las condiciones de operación de la bomba. Los parámetros principales a controlar durante este periodo fueron el TRH y las condiciones hidrodinámicas del reactor.

Cabe resaltar que en el periodo de arranque de ambos reactores el porcentaje de remoción de carga orgánica y la producción de biogás no fueron parámetros relevantes, ya que el objetivo fue alcanzar el funcionamiento saludable del reactor y a la adaptación al sustrato y las condiciones ambientales y de operación. De acuerdo a lo anterior, en esta etapa se monitorearon DQO_t, DQO_s, ST, SV, SF y pH en el influente y en el efluente, siguiendo la metodología ya descrita, todos los análisis se realizan por triplicado; en el punto de muestreo 4 para el reactor UASB y en el punto de muestreo del Fafa se evaluaron la relación AGV/Alc siguiendo la metodología de titulación de acuerdo a KAPP [46], realizando el análisis por duplicado; el biogás producido fue colectado por el método de desplazamiento de solución barrera y fue caracterizado empleando el medidor GeoTech Biogas 2000. Todos los parámetros fueron monitoreados dos veces por semana.

4.5 Estabilización y monitoreo del sistema de digestión anaerobia.

Se considera estado estable o estacionario al periodo de tiempo en el cual las tasas de producción de gas y de remoción son constantes (con variaciones de $\pm 5\%$) [3, 6 10] este comportamiento debe ir asociado a una baja relación AGV/Alc, para el UASB < 1 y para el FAFA $< 0,3$ [54], pH superior a 6.5 y una baja concentración de SV en el efluente en comparación con la concentración en el influente. Cuando se logra esto, un incremento en la OLR por medio de un aumento en el caudal de alimentación y reducción del TRH comenzó a ser evaluado.

4.6 Evaluación de la eficiencia del sistema de digestión anaerobia.

La evaluación de la operación del sistema de digestión anaerobia se realizó evaluando en cada uno de los reactores las variables hidráulicas, de estabilidad y de eficiencia, siendo esta última el rendimiento de biogás y el porcentaje de metano, además del porcentaje de remoción de carga orgánica.

Considerando que las muestras de porquinaza son puntuales, algunas de las variables difieren ampliamente durante el periodo experimental, por lo que alcanzar una tendencia en una regresión lineal no es posible, por lo tanto se emplearon modelos de calibración como herramienta para identificar el comportamiento observado y predicho de las variables respuesta en relación con las variables paramétricas del proceso, para esto se emplean los programas estadísticos OriginPro8 y Statgraphics Centurion.

4.7 Ensayos de fertilización con el efluente y el lodo producido en la digestión anaerobia

Para evaluar el valor fertilizante del efluente y del lodo del sistema de tratamiento anaerobio, se llevaron a cabo ensayos de diferentes tratamientos con la gramínea pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). El ensayo fue realizado en campo en la Finca Guachacal, vereda Guayabal del municipio de Heliconia (ANT), localizado geográficamente a $6^{\circ} 12' 45''$ de latitud norte y $75^{\circ} 43' 50''$ de longitud Este, se encuentra a 1440 metros sobre el nivel del mar y tiene una temperatura promedio de 21°C . El ensayo no fue realizado en el Norte de Antioquia ya que los suelos con los que se contaba para el ensayo – predios de Supercerdo S.A – tenían una alta concentración de materia orgánica, ya que constantemente recibían porquinaza fresca, además el

predio seleccionado para el ensayo es la granja experimental del Grupo de Estudios Moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia y presentaba las características requeridas para este experimento.

4.7.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente y del lodo del reactor UASB.

El efluente tal como se obtiene del reactor fue caracterizado para: Calcio total (CaO), Magnesio total (MgO), Potasio total (K₂O), Sodio total (Na), Zinc total (Zn), cenizas, carbono orgánico oxidable total, conductividad eléctrica, fósforo total (P₂O₅), nitrógeno orgánico total (N total), pH, relación C/N, mesófilos, termófilos, mohos, levaduras, nematodos y/o protozoos, entero bacterias y salmonella. En cuanto al lodo, se recolectó 1 L del PM1 del reactor UASB. El lodo fue pasado por papel filtro y luego secado a 50°C durante 24 h, luego fue macerado para lograr un tamaño de partícula homogéneo. El producto del proceso anterior fue caracterizado para los siguientes parámetros: Calcio total (CaO), Magnesio total (MgO), Potasio total (K₂O), Sodio total (Na), Zinc total (Zn), cenizas, CIC, CIC/CO, carbono orgánico oxidable total, conductividad eléctrica, fósforo total (P₂O₅), humedad, nitrógeno orgánico total (N total), pH, relación C/N, entero bacterias y salmonella. Todos los parámetros son comparados con lo enunciado en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 [38] como valores de referencia.

El sistema de digestión anaerobia se encuentra en una continua producción de efluente dadas las características de su funcionamiento, pero la generación de lodos es baja y las purgas realizadas cuando el sistema aún no se encuentra con un nivel de lodos alto que exija su remoción, genera la desestabilización y una caída en las eficiencias. Dado lo anterior, el lodo fue caracterizado y comparado con la norma para establecer su potencial fertilizante, pero dada la poca cantidad recolectada no fue empleado en los ensayos de fertilización.

4.7.2 Muestreo y caracterización fisicoquímica del suelo.

Para el diseño de las formulaciones y tratamientos a los que será sometido el modelo biológico es importante contar con las características del suelo que será empleado, ya que ofrece información relevante para el análisis de los resultados. Se seleccionó un terreno de la finca con un área de 800 m², el cual no ha sido sometido a un plan de

fertilización ni al sostenimiento de bovinos en varios años, en este se establecen seis puntos de forma aleatoria y la muestra de suelo es tomada a una profundidad de 30 cm, siguiendo el protocolo sugerido por el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Como pre tratamiento, el suelo es mezclado y tamizado por una malla con tamaño de poro de 4 mm y luego es caracterizado para los siguientes parámetros en el mismo laboratorio: Calcio total (CaO), Magnesio total (MgO), Potasio total (K₂O), Sodio total (Na), Zinc total (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cenizas, CIC, CIC/CO, Carbono orgánico oxidable total, CRA, fósforo total (P₂O₅), humedad, nitrógeno orgánico total (N total), pH, conductividad eléctrica, relación C/N.

4.7.3 Diseño experimental.

Para las condiciones de Antioquia, la recomendación general es que la dosificación de materiales orgánicos tenga como base el aporte de nitrógeno que hace el material. Esto ya que en términos generales es el nutriente de mayor demanda por los cultivos y es el elemento que más se cuestiona por su potencial contaminante de aguas subterráneas y superficiales. Por lo anterior el plan de fertilización se diseñó para determinar los niveles de nitrógeno aplicado al suelo – kg N/Ha/año – en términos del volumen de cada fertilizante y del momento de la aplicación del mismo. [55]

Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con tres tratamientos y cuatro replicas por tratamiento. Los ensayos fueron realizados en campo y cada replica contemplaba un área de 34,2 m² que ya se encontraba con esta variedad de pasto. Se realizó un corte del pasto y limpieza del área, para posteriormente aplicar las dosis de fertilizante definidas para cada tratamiento [43, 49, 65] (Tabla 4)

Tabla 4. Diseño experimental para evaluación del potencial de fertilización del efluente del sistema de tratamiento anaerobio de porquinaza en la producción de pasto.

T2	T3	T1	T3
T1	T2	T3	T1
T2	T1	T2	T3
T1: Efluente			
T2: Influyente			
T3: Blanco (Sin fertilización)			

- Dosis fertilizante y frecuencia de aplicación.

Se aplica al iniciar el ciclo - el cual se define como el momento en el que el pasto es cortado o consumido por los bovinos especializados en la producción de leche - asumiendo un periodo de 35 días. Considerando lo anteriormente planteado y los requerimientos de nitrógeno de este tipo de cultivo se establecen las cantidades de efluente y de porquinaza que se deben aplicar. [52] (**Tabla 5**)

Tabla 5. Dosis de efluente e influente aplicadas en las parcelas con el tratamiento 1 (Efluente) y tratamiento 2 (Influente).

	Tratamiento 1 (Efluente) ^(c)	Tratamiento 2 (Influente) ^(d)
L ciclo⁻¹ (a)	48	217
Kg N L⁻¹ (b)	0,005	0,001

- Mantenimiento y seguimiento del ensayo.

Los cultivos de pasto no requieren de segundas dosis de fertilizante, se monitorea que las condiciones de los diferentes ensayos sean homogéneas, que no sean afectadas por variables diferentes a las establecidas en el diseño experimental [52]

- Variables a evaluar.

Al terminar el ciclo se realizó el corte total para cada uno de los ensayos y se determinó la influencia del fertilizante evaluando biomasa producida, nitrógeno, fósforo y potasio. El efecto más notable de la fertilización es el rendimiento de biomasa, esta respuesta es la que generalmente se analiza para demostrar los beneficios obtenidos por la aplicación, las demás variables dan cuenta de la calidad del forraje [11, 43, 49].

4.8 Evaluación del impacto ambiental de la recuperación energética y material de la porquinaza.

Dada la importancia de establecer alternativas para el manejo de la porquinaza, que consideren la mitigación de los impactos ambientales, se desarrolla el diseño conceptual de una planta con capacidad de tratamiento de la totalidad de la porquinaza generada en la granja de cerdos pre cebo, la cual es de 30 m³ día⁻¹ ya que el sistema productivo cuenta con 5000 cerdos y tiene altos consumos de agua en el lavado y de desperdicio de

los bebederos, se establece cualitativamente los impactos ambientales que generaría su montaje y operación.

Se empleó la metodología Conesa Fernández – Vitora [66], la cual propone la elaboración de una línea base, la identificación de las actividades del proyecto y de los componentes ambientales susceptibles de ser impactados – Matriz de identificación de efectos – terminando con una valoración cualitativa de los impactos; de esta forma es posible establecer cuales actividades y cuales componentes ambientales fueron los principalmente impactados.

Se tomó como línea de referencia el manejo actual que se le da a la porquinaza en este sistema productivo, la cual es la aplicación directa en suelos sin ningún tipo de tratamiento.

La alternativa se elabora de acuerdo a los resultados obtenidos en la escala de laboratorio y a lo sugerido por la literatura especializada, identificando y describiendo las fases del proyecto y las actividades asociadas a cada una, además de los componentes ambientales susceptibles de ser impactados.

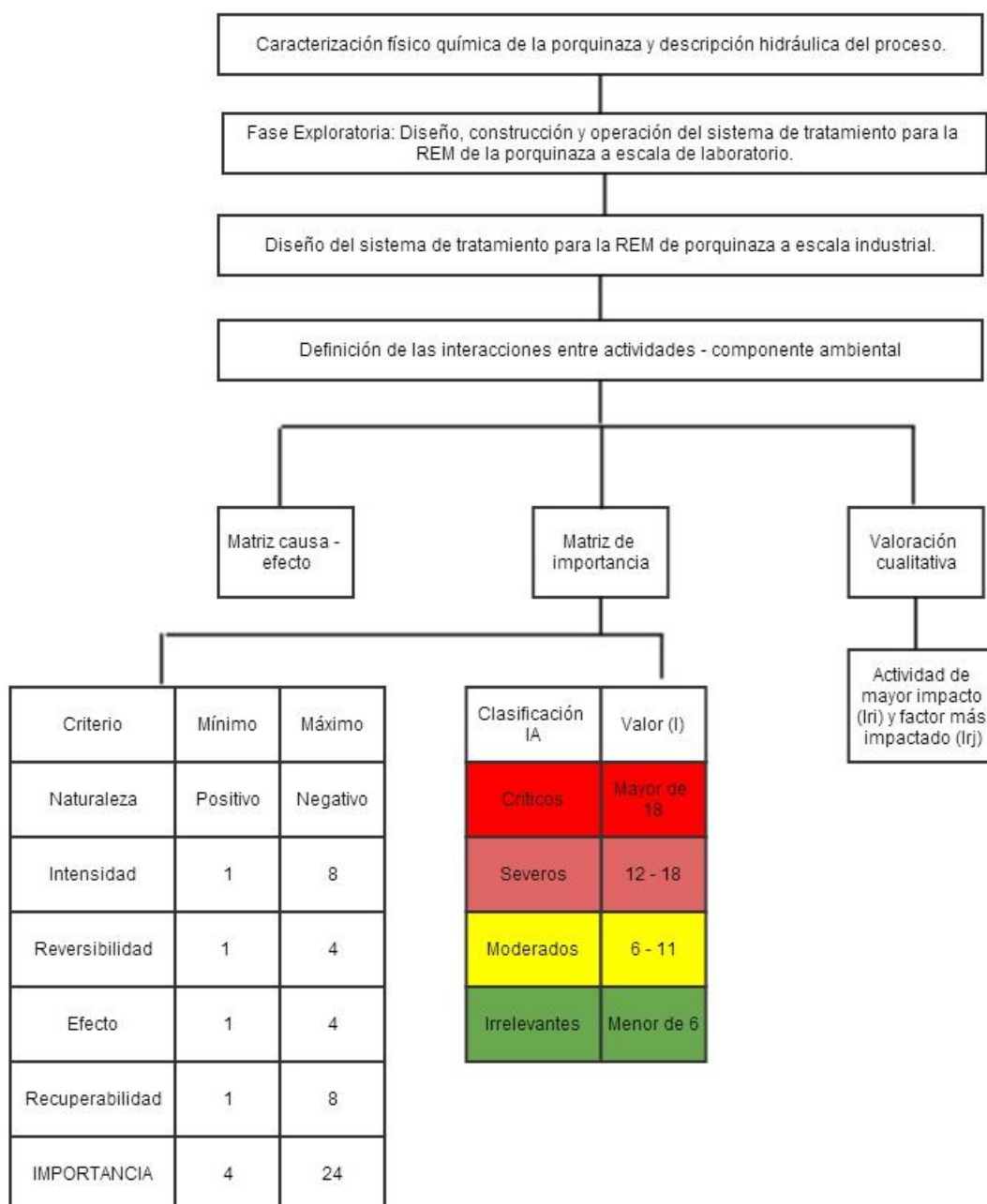
Se determinó la importancia de los impactos ambientales en función de la naturaleza del impacto y los atributos presentados en la Tabla 6 empleando la Ecuación 19. A cada factor ambiental se le asignó un peso ponderado (UIP), que permitió obtener la matriz de importancia y determinar las actividades que causan un mayor impacto y los factores más impactados por las actividades del proyecto.

$$I: \pm(3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad (\text{Ecuación 19})$$

Tabla 6. Atributos para la valoración de impactos ambientales por la metodología Conesa Fernández. [66]

<p>Intensidad (I) Grado de incidencia de la actividad textil sobre el componente ambiental</p>	<p>Recuperabilidad (MC) Posibilidad de reconstrucción total o parcial del componente afectado, como consecuencia de la actividad textil, es decir, retornar a las condiciones iniciales por medio de intervención humana.</p>	<p>Acumulación (AC) Se refiere al aumento del efecto cuando persiste la causa (efecto de las sustancias tóxicas)</p>
<p>Baja 1 Media 2 Alta 4 Muy alta 8</p>	<p>Recuperable de manera inmediata 1 Recuperable a medio plazo 2 Mitigable 4 Irrecuperable 8</p>	<p>No existen efectos acumulativos 1 Existen efectos acumulativos 4</p>
<p>Reversibilidad (RV) Posibilidad de reconstrucción del factor ambiental impactado por la actividad textil, es decir, de retornar a las condiciones iniciales por medios naturales.</p>	<p>Efecto (EF) Se refiere a la forma de manifestación del impacto sobre un componente ambiental, como consecuencia de una actividad textil</p>	<p>Periodicidad (PR) Hace referencia al ritmo de aparición del impacto</p>
<p>Corto plazo 1 Mediano plazo 2 Irreversible 4</p>	<p>Indirecto 1 Directo 4</p>	<p>Irregular- aperiódico discontinuo 1 Periódicos 2 Continuos 4</p>

Figura 7. Diagrama de la metodología de evaluación de impacto ambiental empleada para la implementación del sistema de recuperación energética y material de porquinaza [66].



5. Resultados y discusión.

5.1 Diseño del sistema.

De acuerdo a las características fisicoquímicas de la porquinaza - Tabla 7 – y lo reportado en la literatura, se seleccionó un sistema de digestión anaerobia en operación continua, compuesto por un reactor UASB conectado en serie con un FAFA. El diseño del reactor UASB se basó en el modelo propuesto por Cavalcanti, 1999.

Tabla 7. Características fisicoquímica de la porquinaza, producto del muestreo continuo durante una semana.

Parámetro	Expresado como	Resultado	d.e
Sólidos totales	mg ST L ⁻¹	10.176,2	3.805,7
Sólidos volátiles	mg SV L ⁻¹	6.714,3	2.909,3
Sólidos fijos	mg SF L ⁻¹	3.461,9	927,6
DQO	mg L ⁻¹	32.963,9	1.460,5
Potasio total	K ₂ O (%)	0,025	0,001
Nitrógeno total	N total (%)	0,12	-
Fósforo total	P ₂ O ₅ (%)	N.D	-
Carbono orgánico oxidable total	No aplica (%)	0,13	-

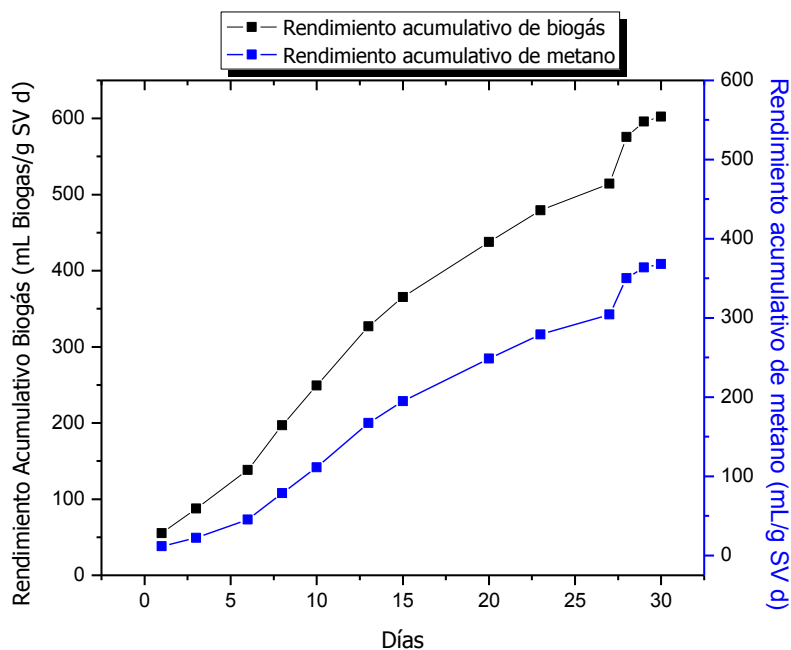
5.1.1 Potencial Bioquímico Metanogenico

La caracterización de la muestra de porquinaza filtrada reporta los siguientes resultados: 23.487 mg ST L⁻¹ y 6.587 mg SV L⁻¹ y el lodo empleado como inoculo: 6.353 mg ST L⁻¹ y 3.140 mg SV L⁻¹. La relación de SV de inoculo/sustrato fue de 0,12 lo que determina que

las concentraciones de estos son suficientes para lograr la degradación máxima de la porquinaza, esto se concluye de acuerdo a lo publicado por Fernández et al 2001 [61], pero de acuerdo a otros autores como Hashimoto A.G. (1989) [69] y Labatut R.A., et al (2011) [40], la relación mínima debe ser de 0.5 para lograr que el proceso inicie en los primeros tres días del ensayo. Cabe resaltar que aunque muchos investigadores indican la importancia de esta relación, en algunos ensayos no es considerado, ya que el rendimiento de metano es consecuencia principalmente de la concentración de sustrato y de la adaptación del inoculo al residuo [58]

El ensayo tuvo una duración de un mes, luego de este el contenido en volumen y porcentaje de metano comenzó a decrecer. La curva de producción de biogás - Figura 8 - puede seguir diversos patrones que no son triviales y tienen implicaciones significativas sobre las características de biodegradabilidad del sustrato y la formación de productos intermedios inhibitorios, los cuales son los que principalmente controlan la cinética de los diferentes pasos de la digestión anaerobia y definen la forma de la curva de producción de biogás. Esto puede ayudar a identificar características importantes del sustrato y anticipar cuestiones de la digestión [40].

Figura 8. Rendimiento acumulativo de biogás y rendimiento acumulativo de metano en PBM de porquinaza.

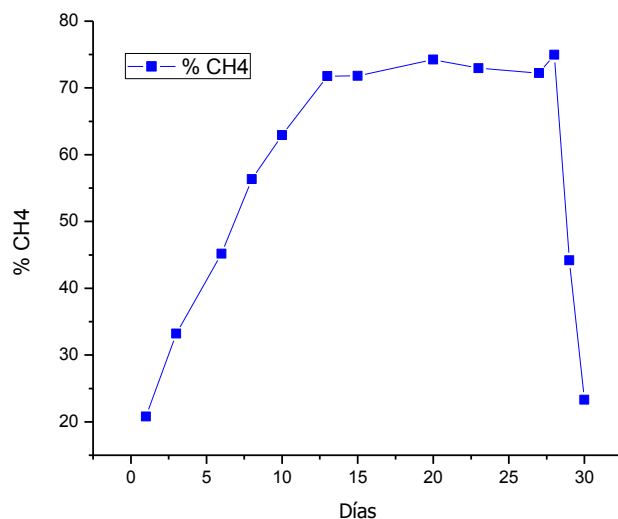


En la Figura 8, en las etapas iniciales del ensayo la producción de biogás es gradual, lo que implica que se lleva a cabo reacciones hidrolíticas de los compuestos complejos de la porquinaza, y se comporta de forma similar hasta el día 25, luego se da un incremento en la producción la cual puede estar asociada a problemas en la agitación. Luego del día 30, el rendimiento de biogás por día y el contenido de metano son igual a cero, por lo que se considera que el sistema comenzó a estar en desbalance, pero esto no es posible demostrarlo debido a la falta de caracterización completa al inicio del ensayo.

El pico de producción de biogás se da al día siete, $93.766 \text{ mL de biogás g}^{-1} \text{ SV día}^{-1}$, el rendimiento acumulativo de biogás fue de $0.779 \text{ m}^3 \text{ de biogás kg}^{-1} \text{ SV adicionado}$, lo que indica que la porquinaza de los galpones de pre cebo de Supercerdo S.A tiene un alto potencial para su tratamiento en la digestión anaerobia. Se debe considerar que el estiércol no es homogéneo y puede ser difícil trabajar con pequeños volúmenes, y la característica del PBM es esta, por lo tanto es posible que en cada botella no se obtenga la misma mezcla, lo cual afecta los cálculos de biogás y metano normalizados.

En la Figura 9 se encuentra que el porcentaje máximo de metano obtenido es del 75% para el día 31 del experimento. En promedio se obtiene un 55.68% de metano, equivalente a $445,44 \text{ mL de metano durante todo el ensayo}$.

Figura 9. Porcentaje de metano producido en el ensayo de PBM en el tiempo.



Por otro lado, el rendimiento acumulativo de metano para la porquinaza fue de $0,416 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$, valor igual al reportado para la porquinaza de cerdos en etapa de destete, el cual según lo reportado por González C., et al., 2009, es de $0,450 \pm 0,150 \text{ L Kg}^{-1}$. Además, se reporta un porcentaje máximo de metano del 65%, y en el presente ensayo fue del 75,4% [71, 72]. Es decir, las características de la porquinaza de los cerdos de Supercerdo S.A es ideal para este tipo de tratamiento anaerobio, además que los valores de metano obtenidos hacen que tenga un excelente potencial para su recuperación.

5.1.2 Reactor UASB.

La investigación experimental fue llevada a cabo en un periodo de un año. El reactor fue construido en Poli Vinil Cloruro (PVC), con un diámetro interno de 16,8 cm y una altura de 176 cm, un volumen total de 39 L y uno de trabajo de 28 L, con las características presentadas en la Tabla 8. El reactor tiene un separador de fases con la forma de un brazo lateral en un ángulo de 45° y cuenta con cuatro puntos de muestreo, en la Figura 10 se presenta el esquema del reactor y de las unidades que lo acompañan.

Figura 10. Reactor UASB empleado para el tratamiento de porquinaza.

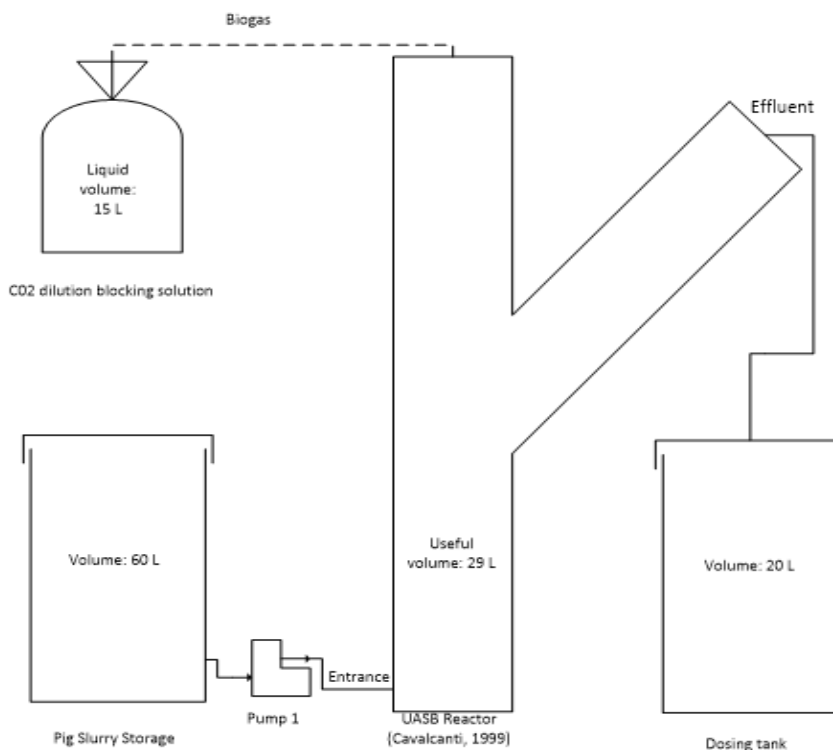


Tabla 8. Características de diseño del reactor UASB.

Altura	m	1,76
Diámetro	m	0,168
Área transversal	m ²	0,264
Volumen total	m ³	0,039
Volumen útil	m ³	0,028
Diámetro brazo	m	0,114
Longitud brazo	m	0,74
Ubicación brazo	m	0,505
Volumen cabeza gas	m ³	0,007

5.1.3 Reactor FAFA

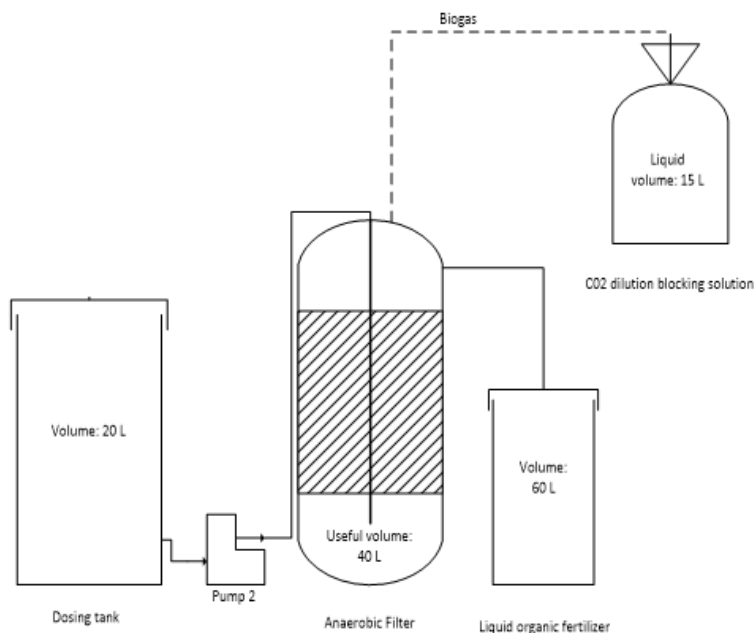
De acuerdo a lo reportado por la literatura, los reactores UASB logran remociones del 60% de carga orgánica, por lo tanto para el cálculo del FAFA se considera una DQO en el influente de 13,186 Kg DQO m⁻³, y de acuerdo a la capacidad de la bomba el caudal de operación fue de 0,115 m³ d⁻¹[27].

El FAFA fue construido en un recipiente plástico con un volumen total de 60 L, una altura y un diámetro de 56 cm y 37 cm respectivamente, cuenta con un punto de muestreo, correspondiente a la zona en la cual se encuentra el lecho. El material de soporte fue conformado por 59 cilindros de espuma de poliuretano de alta densidad, con una altura de 30 cm, diámetro interno de 3 cm y diámetro externo de 5 cm cada uno, con una porosidad y un área superficial de 97,29% y 67,649 m² m⁻³ respectivamente, las características generales se presentan en la Tabla 9 y en la Figura 11 se presenta el esquema general de este reactor.

Tabla 9. Características de diseño del reactor FAFA para el tratamiento de porquinaza.

Altura	m	0,560
Diámetro	m	0,370
Volumen total	m ³	0,060
Volumen útil	m ³	0,049
Área transversal	m ²	0,581
Volumen espacio gas	m ³	0,005
Volumen lecho	m ³	0,045

Figura 11. Reactor FAFA para el tratamiento de porquinaza tratada en un reactor UASB.



5.2 Parámetros operacionales y de estabilidad del reactor UASB.

El reactor UASB estuvo en funcionamiento durante 10 meses, en los cuales el sistema fue alimentado con muestras puntuales de porquinaza, razón por la cual el control del reactor se realiza principalmente con las variaciones en las condiciones hidráulicas de la operación. En la Tabla 10 se presentan las condiciones promedio en las que operó el reactor durante el experimento.

Tabla 10. Condiciones de operación promedio del reactor UASB usado para el tratamiento de porquinaza.

Parámetro	Unidades	Promedio	d.e
Caudal	$m^3 d^{-1}$	0,049	0,038
TRH	D	1,13	0,79
V up	$m h^{-1}$	0,008	0,006
DQO t in	$Kg m^{-3}$	14,29	8,83
DQO s in	$Kg m^{-3}$	8,422	5,746

DQO t ef	Kg m ⁻³	6,31	2,29
DQO s ef	Kg m ⁻³	4,809	2,003
OLR	Kg m ⁻³ d ⁻¹	20,189	15,423
pH in	-	6,955	0,632
pH ef	-	7,401	0,349
AGV/Alc		0,42	0,308
Porcentaje de remoción	%	45,841	26,277
Volumen de biogás	L	10,421	4,371
Porcentaje de metano	% CH ₄	55,37	14,049
Volumen de metano	L	5,978	3,105
Volumen de biogás por gramo de DQO	L biogás g DQO ⁻¹	0,034	0,024
Volumen de biogás por volumen del reactor en un día	L biogás L reactor ⁻¹ d ⁻¹	0,372	0,156
Volumen de metano por gramos de DQO	L metano g DQO ⁻¹	0,0198	0,0153
Volumen de metano por volumen del reactor en un día	L metano L reactor ⁻¹ d ⁻¹	0,2136	0,111

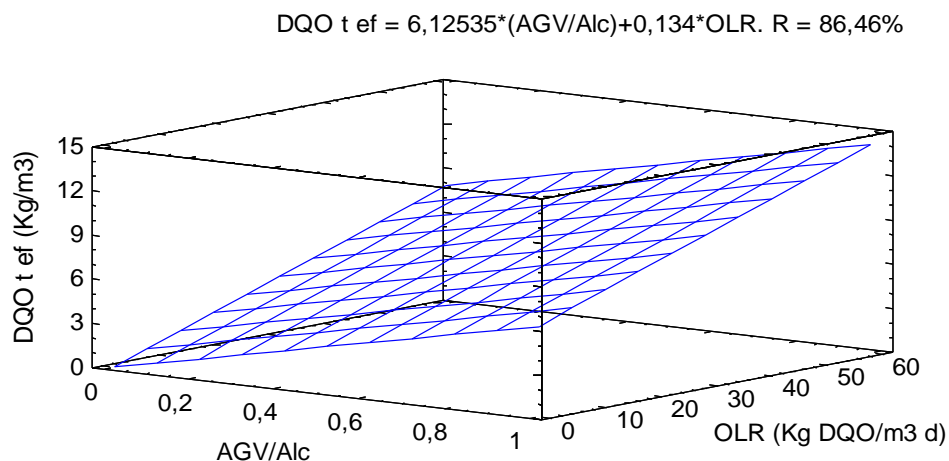
Las variables tanto hidráulicas, orgánicas y de estabilidad del sistema fueron analizadas con el objetivo de evidenciar la relación entre ellas, indagando acerca de la importancia de estas sobre la eficiencia del reactor UASB ya que la variación en la geometría del reactor trae asociado posibles cambios en las variables de operación las cuales aún no han sido reportadas en la literatura.

Los procesos de digestión anaerobia, como los ocurridos en el reactor UASB, representan procesos catabólicos que ocurren en ausencia de oxígeno molecular (O₂) mediados por diferentes microorganismos que actúan de forma sintrófica para transformar biológicamente una porción significativa de la carga orgánica del sustrato a biogás (CH₄ y CO₂) [12, 14] por lo tanto la influencia de las variables hidráulicas, orgánicas y de estabilidad no pueden ser analizadas de forma independiente, por esta razón se proponen modelos que relacionan estas variables y se identifica cuál de estas son influyentes sobre la estabilidad, la remoción de carga orgánica y la producción de biogás y metano en el reactor.

Eficiencia en la remoción de carga orgánica.

Se evalúa con base en la DQO t en el influente y en el efluente, la reducción en el valor de este parámetro en el efluente es el resultado de una serie de factores microbiológicos, físicos y químicos dentro del reactor. Se acepta que la digestión anaerobia de residuos orgánicos es un complejo multi etapa, muchos pasos toman lugar simultáneamente y son ejecutados por cuatro grupos de bacterias [18, 73] cuya actividad metabólica está asociada a múltiples factores y se refleja en la eficiencia en la remoción de la carga orgánica y en la estabilidad. En la Figura 12, la relación AGV/Alc tiene una alta influencia sobre la DQO t del efluente, indicando que a valores bajos de esta relación se favorecen las condiciones microbiológicas para la oxido-reducción de la materia orgánica, tal como lo recomienda KAPP [46].

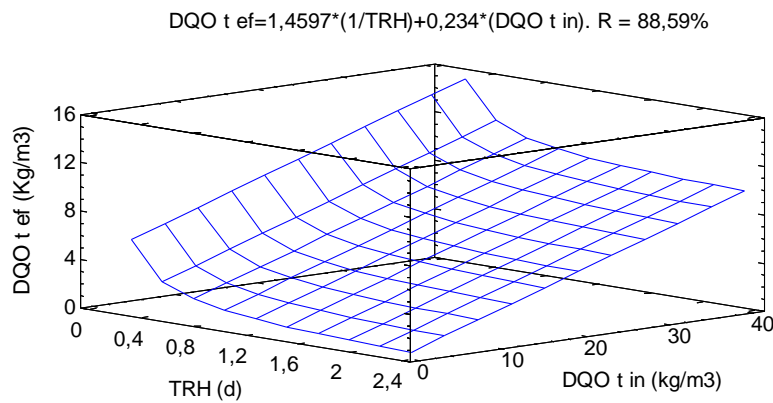
Figura 12. Modelo de la relación AGV/Alc y OLR con la DQO t ef.



La tasa de carga orgánica (OLR) es un importante parámetro que afecta significativamente la ecología microbiana y las características del sistema UASB, toma en cuenta la tasa de flujo del líquido y la concentración contaminante [28], cuando hay variaciones en la OLR del reactor, en cada cambio se pasa de un régimen de estado cuasi estacionario a otro. Este término es considerado para este reactor ya que un verdadero estado estacionario no podría ser logrado bajo las condiciones prácticas. Esto probablemente es el resultado de incrementos de la lisis de la biomasa causada por sobrecargas orgánicas temporales del reactor [74].

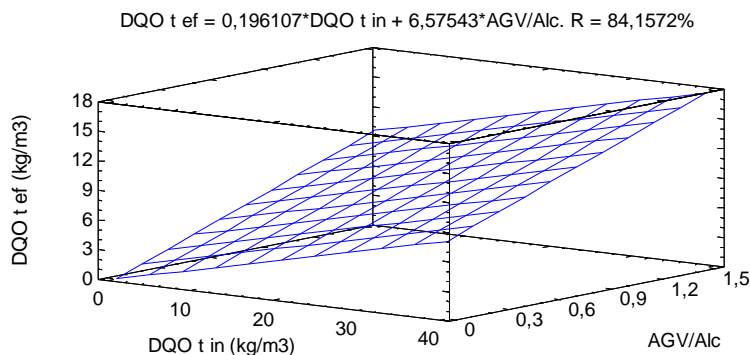
En la Figura 13, TRH superiores a 1 d mantienen una DQO t en el efluente baja y a valores inferiores a 0.8 d la capacidad de remoción que tiene el reactor se ve afectada, este resultado es contrario al obtenido por Sánchez E., et al 2005 [30] quien estableció que TRH en el rango de 4 a 8 días para el tratamiento de la fracción líquida de la porquinaza en reactores UASB operados en un rango de temperatura de 30 a 35°C, se asocian a un proceso bien balanceado mientras que en TRH inferiores o iguales a dos días, las eficiencias de remoción decrecen levemente y se producen condiciones de desbalance; estas diferencias pueden ser causa de las variaciones de carga orgánica que sufría el sistema - condiciones cuasi estables -

Figura 13. Modelo de la relación TRH (d) y la DQO t in (kg m^{-3}) sobre la DQO t ef.



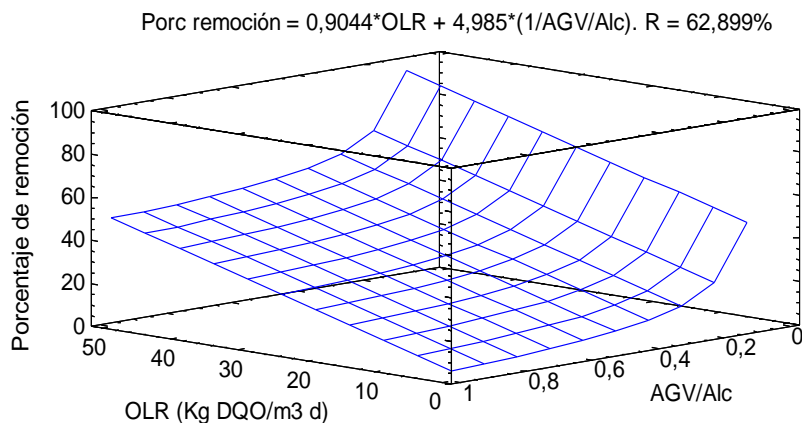
El reactor UASB evidencia la capacidad de tratar porquinaza con altas concentraciones de materia orgánica siempre que las condiciones de estabilidad tales como el pH y la relación AGV/Alc favorezcan el metabolismo microbiano (Figura 14), esta afirmación debe ser evaluada junto con otras variables del sistema, ya que cargas orgánicas muy altas, como ha sido demostrado por otras investigaciones, tienden a desestabilizar el sistema ya que el metabolismo de los microorganismos metanogénicos en comparación con el de las otras especies presentes en la digestión anaerobia es lento, y de no encontrarse en equilibrio, la acumulación de ácidos grasos volátiles en el sistema lo acidifica generando inhibición [75].

Figura 14. Modelo de la relación entre AGV/Alc y DQO t in con la DQO t ef.



En la Figura 15 se resume la influencia de las diferentes variables sobre el porcentaje de remoción, encontrando que una relación de AGV/Alc igual o inferior a 0.3 asociadas a valores altos de OLR, tienen relacionado un alto porcentaje de remoción. Cuando la relación AGV/Alc fue de 0.226 se presentó el mayor porcentaje de remoción, igual al 79%. Diferentes investigaciones, han observado que las condiciones de inestabilidad aparecen a valores de AGV/Alc mayores a 0.5 [8, 30, 63]. Esta condición se presenta porque en la digestión anaerobia, los microorganismos formadores de ácidos y los formadores de metano difieren ampliamente en términos de necesidades nutricionales, fisiológicas, cinética del crecimiento y sensibilidad a las condiciones ambientales y fallas en el mantenimiento del balance entre estos dos grupos de microorganismos es la causa primaria de inestabilidad en el reactor [76], de lo obtenido en la presente investigación, el reactor UASB tolera valores un poco más extremos de esta relación.

Figura 15. Modelo de la relación entre AGV/Alc y OLR con el porcentaje de remoción.

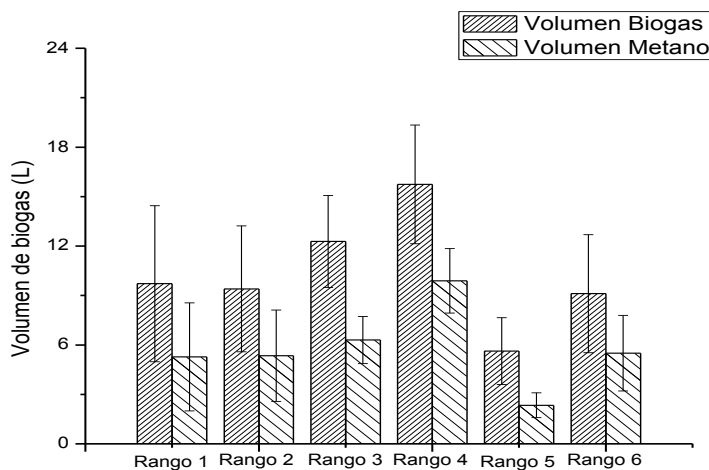


Eficiencia en la producción de biogás y metano:

La producción de metano en la digestión anaerobia involucra la conversión de materia orgánica a CH_4 y CO_2 bajo ciertas condiciones de temperatura, presión ambiente y pH cercano al neutro en la ausencia de aceptores de electrones exógenos tales como oxígeno, nitrato y sulfato a través de una compleja serie de interacciones microbianas [72]. Dadas las variaciones en las condiciones de operación del sistema, el volumen de biogás también fue variable aunque el de metano se estabilizó bajo ciertos rangos de operación. El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros gases producto de la digestión anaerobia de la materia orgánica y el metano solo es liberado por el metabolismo de los microorganismos metanogénicos a partir del CH_3CO_2^- y CO_2 por lo tanto este da cuenta del estado de estos metanogénicos dentro del sistema.

Las eficiencias de biogás y metano en el reactor UASB se presentan asociando la producción en litros a diferentes rangos de materia orgánica de entrada, estos fueron definidos estableciendo rangos de cinco unidades de DQO, razón por la cual la cantidad de valores asociados a cada rango es variable (Figura 16). En los rangos 3 y 4 fue en los que se presentó la mayor producción de biogás y de metano, estos correspondieron a una carga orgánica entre 13,131 – 19,983 kg m^{-3} , en este la producción de biogás fue de 12,280 L ($\pm 2,792$) y 15,748 L ($\pm 3,601$) y de metano fue de 6,297 L ($\pm 1,428$) y 9,890 L ($\pm 1,957$) correspondiente al 51,28% y 62,81% de metano. Es importante anotar que en este rango es en el que se presenta un porcentaje de remoción superior al 50%, siendo el más alto el de 79% y el mayor porcentaje de metano alcanzado fue de 73%, por lo tanto se considera como un rango de operación en el que se optimiza la eficiencia del reactor.

Figura 16. Producción de biogás y metano asociado a los diferentes rangos de materia orgánica. Rango 1: 3,982 – 6,6 kg L⁻¹. Rango 2: 7,825 – 10,759 Kg L⁻¹. Rango 3: 13,131 – 15,543 Kg L⁻¹. Rango 4: 18,456 – 19,983 Kg L⁻¹. Rango 5: 22,5 – 23,872 Kg L⁻¹. Rango 6: 28,743 – 30,169 Kg L⁻¹.



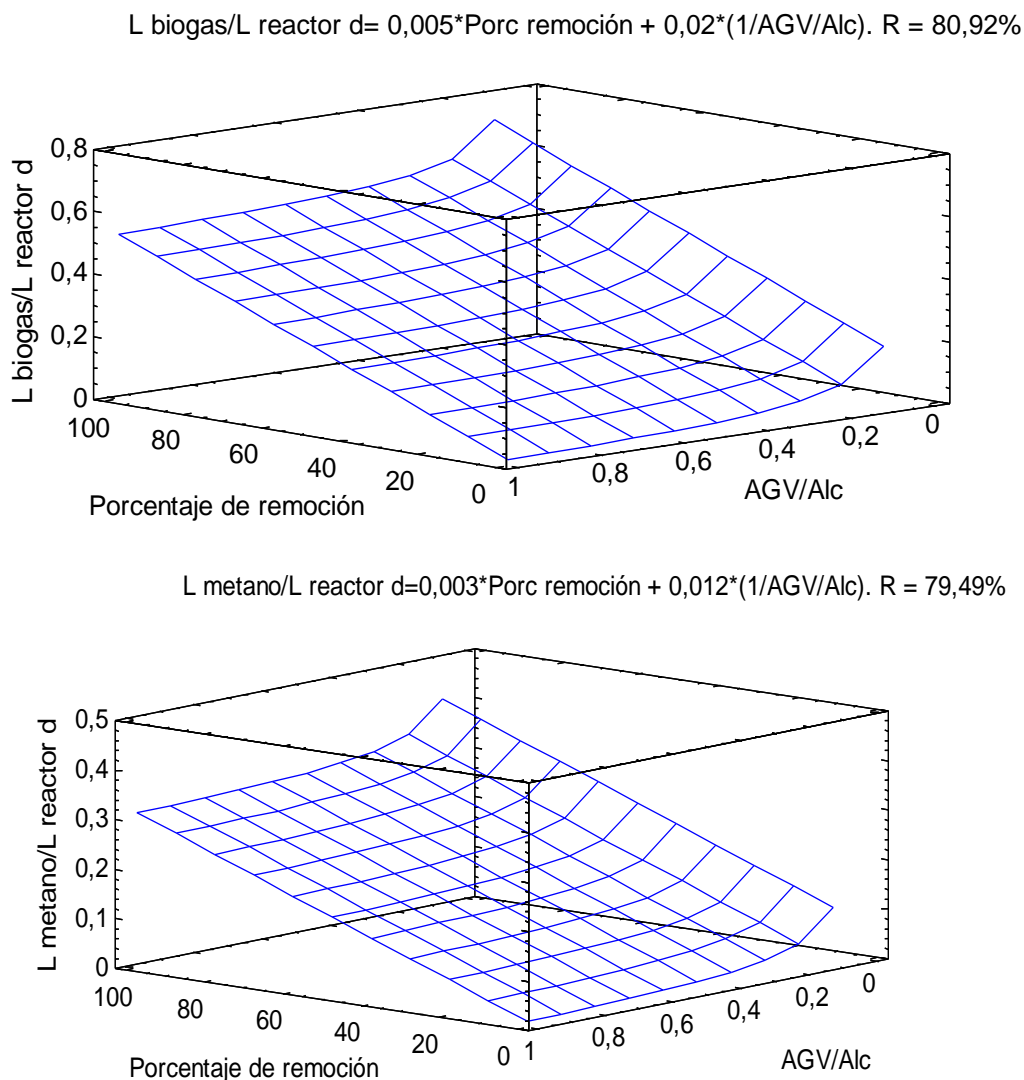
Este reactor opera bien en un rango de concentración de materia orgánica en el influente de 13 a 19 Kg DQO m³ siempre que se encuentre asociada a una relación AGV/Alc óptima, paralelamente cabe señalar que concentraciones altas de DQO tienden a incrementar el valor de AGV/Alc y por lo tanto llevar el reactor a condiciones inestables. Valores bajos de DQO reducen el rendimiento de biogás.

En la Figura 17 se presentan los rendimientos de biogás considerando su relación con el volumen del reactor. Existe una dependencia de este sistema a una concentración de AGV/Alc inferior a 0,3 – tal como se presentó anteriormente – ya que en los diferentes casos hay una marcada diferencia al favorecer el funcionamiento del reactor. Por otro lado, cuando hay un alto consumo de materia orgánica en el reactor, es decir, un alto porcentaje de remoción, se favorece la producción de biogás y metano, tal como se espera que funcione este sistema biológico ya que la cantidad de sustrato que es usado por los microorganismos para reemplazar biomasa celular y para proporcionar energía para el mantenimiento es baja en comparación con la requerida para la producción de metano [77].

El valor de 0,567 L biogás L reactor⁻¹d⁻¹ es el mayor rendimiento de biogás alcanzado con un valor de 0,101 en la relación AGV/Alc y 19,924 kg DQO t in m⁻³, el cual corresponde al mayor porcentaje de metano y de remoción en el periodo de operación del reactor, el rendimiento de metano es igual a 0,414 L metano L reactor⁻¹d⁻¹.

Para el agua residual porcicola, como se planteó anteriormente, el uso de reactores UASB ha sido estudiado con resultados prometedores. Song et al. (2010) [77] opero un reactor UASB de 35 m³ a una temperatura de 35°C, usando un TRH decreciente a partir de 7.0 a 3.5 y OLR incremental a partir de 1.3 a 5.8 kg DQO m⁻³ d⁻¹, logrando eficiencias de remoción de 4.0 a 78.7% de la DQO; Rodríguez et al. (2010) [78] evaluó un sistema compuesto por un decantador de 7,4 m³ seguido por un reactor UASB de 11.5 m³ y aplico una OLR de 1.1 a 17.5 kg DQO m⁻³ d⁻¹ y TRH de 1.7 a 4.1 d en el reactor UASB para tratar porquinaza, observando una eficiencia de remoción promedio de la DQO del 85% en el reactor UASB; K. V. Lo, (1994) [79] evaluó un reactor hibrido UASB con una matriz de soporte en la sección media, con la que logro un porcentaje de remoción del 57% y 0,71 L CH₄ L reactor⁻¹ d⁻¹; Sánchez E., et al, 2005 [30] obtuvo un rendimiento de 0,86 L biogás L reactor⁻¹ d⁻¹ con una concentración máxima de metano del 33,3% con una OLR de 8,1 g DQO t L⁻¹ d⁻¹ y el mayor porcentaje de metano lo obtuvo a una OLR de 1 kg DQO m³ día⁻¹ con un rendimiento de biogás de 0,45 L biogás L reactor⁻¹ d⁻¹ en un ensayo en un reactor UASB convencional, este hecho lleva a considerar que la modificación en diseño de este reactor realmente favorece la estabilidad ya que el separador de fases es mucho más eficiente que el convencional y adicionalmente el reactor opera con unas altas tasas de carga orgánica [22]

Figura 17. Modelos del rendimiento de biogás y metano respecto al volumen del reactor en relación con el porcentaje de remoción y la relación AGV/Alc del reactor.



Condiciones de operación estable del reactor:

Operación estable se define como el momento en el que la DQO t en el efluente y el porcentaje de metano tienen variaciones de $\pm 5\%$ [79] El reactor UASB no contó con características de operación constante y por lo tanto no fue posible alcanzar una DQO t en el efluente constante, pero con el porcentaje de metano si es posible establecerlo, ya que después de un tiempo de operación, los microorganismos metanogénicos responden a las características del sustrato alimentado. Luego de 74 días de operación se alcanzó

un porcentaje de metano promedio del 68% ($\pm 5\%$), bajo las condiciones de operación reportadas en la Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones de operación estable del reactor UASB usado para el tratamiento de porquinaza.

Parámetro	Unidades	Valor
Caudal	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$	0.013 - 0.019
TRH	D	2.160 – 1.496
V up	m h^{-1}	0,002 - 0,003
OLR	$\text{Kg DQO m}^{-3} \text{d}^{-1}$	3.318 – 19.983
AGV/Alc		Menor o igual a 0.306
pH influente		6.42 – 7.01

Las variables hidráulicas, orgánicas y de estabilidad de este reactor son influenciadas por el TRH, para este reactor un tiempo de 1.496 d es el mínimo en el cual se alcanzan las condiciones estables de operación y los rendimientos reportados, de acuerdo a Lettinga G., 1991 [80] este tiempo depende del tipo de lodo presente en el reactor y de la calidad del separador gas – sólido - líquido, ya que el mantenimiento de altas concentraciones de biomasa activa en el reactor favorece la operación y la estabilidad del mismo [14]. Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la digestión anaerobia de la porquinaza en el reactor UASB propuesto por Cavalcanti P et al [22] permite tratar altas cargas orgánicas con TRH bajos en comparación con lo reportado en la literatura, conservando la estabilidad del sistema, porcentajes de remoción superiores al 70%, un rendimiento de biogás de $0.567 \text{ L biogás L reactor}^{-1} \text{d}^{-1}$ y un porcentaje de metano superior al 73%, esto puede ser consecuencia de una mayor eficiencia del separador que posee en reactor UASB. Cuando el sistema se encuentra bajo los parámetros de operación presentados en la Tabla 12, el sistema presenta los siguientes rendimientos promedio:

Tabla 12. Rendimientos del reactor UASB bajo condiciones de operación estable.

Parámetro	Unidades	Rango
Porcentaje de remoción materia orgánica	%	42 – 79
pH ef		6,99 – 7,46
Metano	% CH ₄	57 – 73
Rendimiento biogás de acuerdo a volumen del reactor	L biogás/L reactor d	0,386 – 0,567

5.3 Parámetros operacionales y de estabilidad del reactor FAFA.

Tal como se expuso en la sección de diseño y arranque del reactor FAFA, este fue puesto en marcha en el momento en que el reactor UASB alcanzó un estado cuasi estable puesto que es un sistema conectado en serie, además el filtro anaerobio fue dimensionado considerando una DQO t en su entrada equivalente al 40% de la DQO t en la entrada del reactor UASB, por esta razón se consideró un TRH de 0.5 d. En el momento de iniciar la alimentación al conectar la salida de efluente del UASB a la alimentación del FAFA, se evidencio que dadas las diferencias de volúmenes entre estos se generaba vacío en el reactor UASB que hacía que el contenido de este último subiera por la salida del biogás, dado lo anterior se instaló un tanque ecualizador que permite homogenizar las variaciones en el flujo y/o en la carga contaminante para suplir las necesidades de caudal del reactor FAFA, el cual fue establecido en $0,115 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, valor superior al caudal de operación del UASB.

Dadas las condiciones anteriormente planteadas, los parámetros promedio de operación del reactor FAFA son las presentadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de operación promedio del reactor FAFA para el tratamiento del efluente del reactor UASB.

Parámetro	Unidades	Valor	d.e
Caudal	$\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$	0,101	0,037
TRH	D	0,764	0,798
V up	m h^{-1}	0,007	0,003

DQO t in	Kg m ⁻³	5,267	2,046
DQO s in	Kg m ⁻³	3,810	1,945
DQO t ef	Kg m ⁻³	1,802	0,494
DQO s ef	Kg m ⁻³	1,546	0,434
OLR	Kg DQO m ⁻³ d ⁻¹	11,002	6,469
pH in		7,364	0,400
pH ef		7,728	0,244
AGV/Alc		0,137	0,093
Porcentaje de remoción	%	61,348	18,742

A diferencia del reactor UASB cuyos parámetros de operación hidráulica fueron variables, el FAFA opero bajo condiciones hidráulicas constantes luego de un periodo en el que funciono a bajos caudales para propiciar el arranque paulatino del sistema – 13 días - el incremento del caudal dependía de la operación del UASB, al igual que las variables orgánicas. Dadas estas condiciones y el tiempo de operación – 162 días - no fue posible determinar las condiciones de operación estable del sistema.

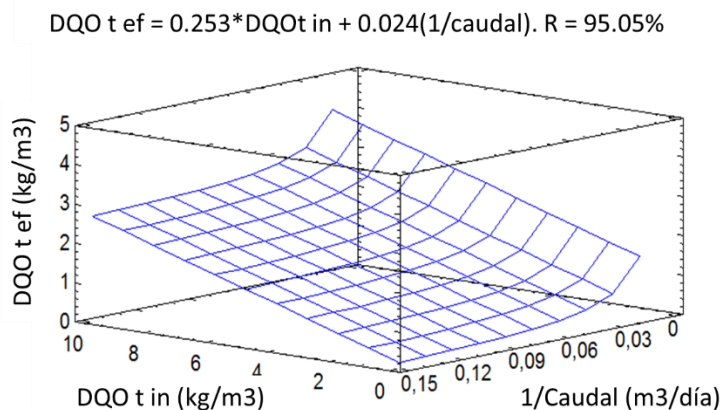
En comparación con la Tabla 10 en la Tabla 13 no se presentan los valores promedio correspondientes al volumen de biogás, porcentaje de metano, volumen de metano, rendimiento de biogás y metano con respecto a la DQO removida, y volumen de biogás y metano por volumen de reactor, ya que presentar un promedio no tendría significancia por las variaciones en la cantidad de datos almacenados.

Eficiencia en la remoción de carga orgánica.

Como se evidencia en la Figura 18 variables tales como el caudal y la DQO t in son importantes en el modelo de la DQO t ef. Los datos observacionales evidencian el efecto de la DQO t in en el reactor ya que valores muy bajos afectaban el metabolismo microbiano ocasionando caídas en la producción de biogás y metano ya que hay una reducción en la tasa de transferencia de masa debida a la reducción en el gradiente de concentración entre el líquido y la biopelícula [5]. Estos valores bajos de DQO t in se deben al rendimiento dado por el reactor UASB, por lo tanto el FAFA no fue sometido a condiciones que permitieran establecer los parámetros de operación en el que se alcance el máximo rendimiento, por esto se considera que el FAFA está en la capacidad de

trabajar con el efluente de varios reactores. Establecer la cantidad de reactores UASB que el FAFA puede recibir para operar en serie es tema de una futura investigación.

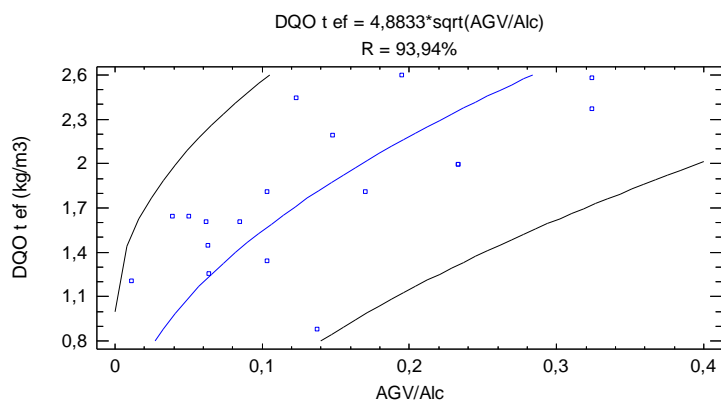
Figura 18. Modelo que relaciona caudal y DQO t in con la DQO t ef.



Se realizó un modelo para evaluar la influencia del caudal y la relación AGV/Alc sobre la DQO t ef, arrojando que el caudal no es significativo en este ($p > 0,05$), por esta razón se corre un modelo de calibración que relacione solo AGV/Alc y DQO t ef (Figura 19).

El incremento en la relación AGV/Alc se refleja en un aumento en la DQO t ef, la literatura plantea que los reactores FAFA operan bien con valores en esta variable menores a 0.3 [54] pero el FAFA opero con valores bajos de AGV/Alc durante todo el ensayo así que experimentalmente no se comprobó cual es el límite tolerado por el sistema y el modelo no permite dilucidarlo.

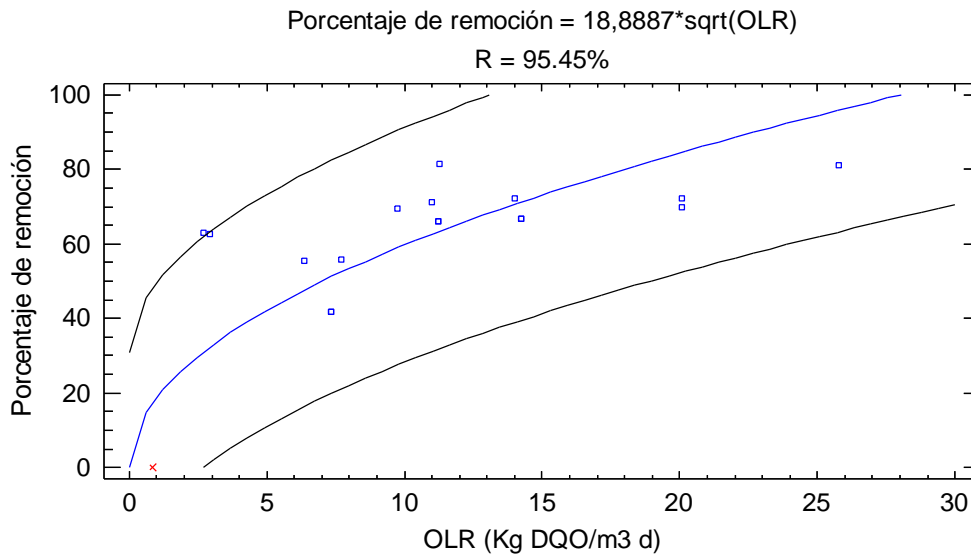
Figura 19. Relación entre AGV/Alc y DQO t ef.



De acuerdo a la bioquímica de los procesos de digestión anaerobia, se espera que exista una relación entre la DQO t in, AGV/Alc y la DQO t ef, pero no existe un modelo con significancia estadística para agruparlas. Experimentalmente se evidencia que valores altos de carga orgánica están asociados con los valores más altos de la relación AGV/Alc y la DQO t ef, es decir, los valores experimentales obtenidos confirman las tendencias definidas para la explicación del reactor.

Se planteó un modelo que relaciona AGV/Alc, OLR y el porcentaje de remoción, pero no existe una relación significativa entre estas variables y el programa estadístico sugiere remover la relación AGV/Alc, por lo tanto en este experimento la variable que es determinante en el porcentaje de remoción es la OLR, la cual influye de forma exponencial sobre el porcentaje de remoción y sugiere que el sistema opera a altas tasas de carga orgánica bajo las condiciones experimentales del reactor ya que este siempre opero en estabilidad (Figura 20).

Figura 20. Relación OLR y porcentaje de remoción.



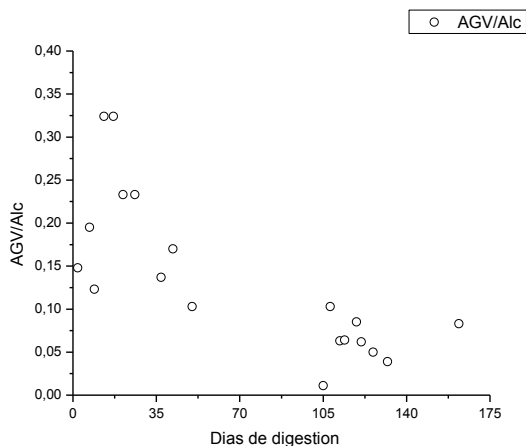
El reactor siempre logro una remoción de materia orgánica superior al 50%, pero esta fue favorecida por los incremento en la carga orgánica en la alimentación, siendo una remoción del 81,161% la mayor, asociada a una DQO t in de 8,737 kg DQO m⁻³. Sánchez E, et al 2005 [5] encontró que para reactores de filtro anaerobio de flujo ascendente que

tratan porquinaza pre tratada – tamizado y sedimentación – la mayor eficiencia de remoción de sustrato fue obtenida con una DQO t in en el rango de 4 – 8 Kg DQO t m⁻³ con un TRH entre 1 y 2 días, además encontró que la concentración de microorganismos dentro del reactor incrementa con la concentración de sustrato en el influente, para el reactor FAFA evaluado, en el que las características del influente son de una porquinaza ya tratada, el óptimo del reactor está por encima de una DQO t in de 8 kg DQO t m⁻³ con TRH de 0.5 d.

Eficiencia de la producción de biogás y metano.

Como se ha planteado anteriormente, durante la operación del FAFA los bajos rendimientos de biogás y metano – “estado estable inhibido” – fueron evidenciados a lo largo del experimento. La alta alcalinidad, baja concentración de AGV y consecuente baja relación AGV/Alc además de un pH en el efluente del reactor de 7.34 a 8.04, pueden ser los posibles causantes de este comportamiento en cuanto a eficiencias del reactor. Además, un pH dentro del reactor cercano o superior a 8.0 favorece la dilución del CO₂ en el medio, lo que se refleja en la alta alcalinidad que presento el reactor durante el experimento.

De acuerdo a las características el efluente del reactor UASB, este puede ser sometido a procesos de degradación biológica como la digestión anaerobia, pero con base en los rendimientos de biogás y metano, es necesario indagar acerca del porque el estado estable inhibido, por definición la inhibición es indicada por el decrecimiento de la tasa de producción de metano y la acumulación de ácidos orgánicos, pero en el reactor FAFA se encontraron mediciones de 3% hasta del 77% de metano y la concentración de AGV siempre fue baja (Figura 21). El efluente del reactor UASB tiene unas características de concentración de materia orgánica que aún es susceptible de ser degradada vía digestión anaerobia, pero se considera que gran parte de este material ya ha sido parcialmente hidrolizado, por lo que las características y condiciones dentro del FAFA en cuanto a comportamiento microbiano son diferenciales. Las fluctuaciones del metano producido pueden deberse a variabilidad temporal de la degradabilidad biológica del influente y presencia potencial de varios materiales orgánicos e inorgánicos que pueden inhibir el rendimiento del tratamiento [81]

Figura 21. Comportamiento de la relación AGV/Alc durante la digestión anaerobia en el FAFA.*Condiciones de operación estable del reactor.*

Tal como se ha señalado, dadas las condiciones de variabilidad en la cantidad y las características de biodegradabilidad del influente y que el reactor no alcanzó el máximo en cuanto a capacidad de carga orgánica, no se habla de condiciones de operación estable, pero en la Tabla 14, se presentan las condiciones más favorables bajo las que opero el reactor.

Tabla 14. Parámetros de operación que favorecen el funcionamiento del reactor FAFA.

Parámetro	Unidades	Valor
Caudal	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$	0,115
TRH	D	0,4
V up	m h^{-1}	0,008
OLR	$\text{Kg DQO m}^{-3} \text{d}^{-1}$	> 13
AGV/Alc		<0,3
pH in		> 6,6

Con estos parámetros de operación, se alcanzaron los siguientes resultados en cuanto a eficiencia (Tabla 15)

Tabla 15. Eficiencias más altas presentadas por el reactor FAFA.

Parámetro	Unidades	Valor
pH ef		8,0
Porcentaje de remoción	%	81,161
Porcentaje de Metano	%	77
Rendimiento biogás	L biogás L reactor ⁻¹ d ⁻¹	0,246

5.4 Eficiencia global del sistema de tratamiento.

Consideramos un sistema cuya entrada es la porquinaza pre tratada y la salida es el efluente del reactor FAFA. La eficiencia en cuanto a la remoción de carga orgánica del sistema y rendimientos de biogás y metano, se presentan con los resultados del periodo en el que se encontraban en operación los dos reactores, es decir, el sistema de tratamiento propuesto completo.

En la Figura 22 se observa que luego que el sistema se encuentra bajo condiciones de operación estable, este incrementa el porcentaje de remoción a la vez que incrementa la DQO en el influente, ya que el material diluido no es el ideal para la producción de metano porque la baja concentración de alimento típicamente no produce una buena tasa de crecimiento bacteriano para evitar el lavado [85]. Con una concentración de DQO t en el influente inferior a 25 kg DQO m⁻³, conservando los rangos de pH, AGV/Alc y TRH reportados para cada uno de los reactores el sistema alcanza un rendimiento global de 0,723 L biogás g DQO⁻¹ con un porcentaje promedio de metano del 75%.

Figura 22. Comportamiento de la remoción de materia orgánica en el sistema de tratamiento en serie UASB – FAFA.

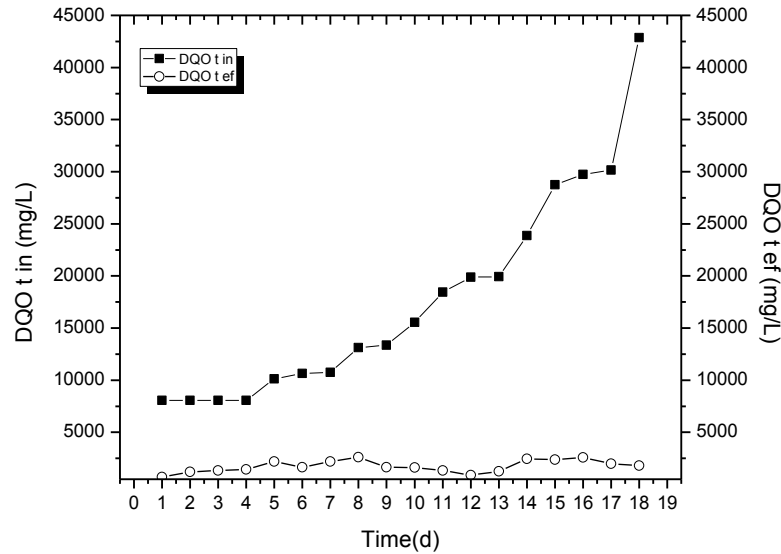
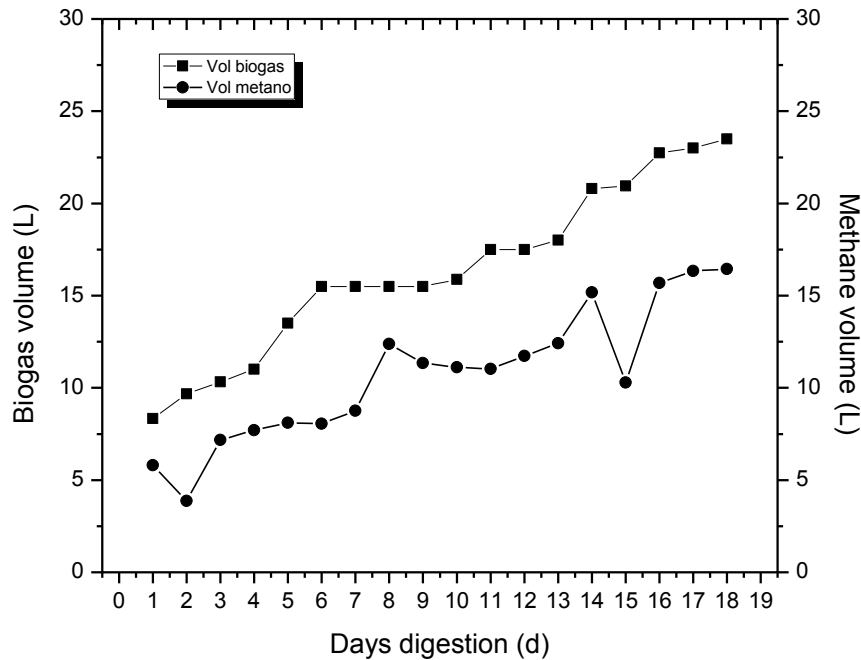


Figura 23. Relación de la producción de biogás y metano asociado a los días de digestión del sistema de tratamiento en serie UASB – FAFA.



5.5 Potencial fertilizante del efluente y el lodo de la digestión anaerobia.

Las características de un efluente susceptible de ser aplicado como fertilizante son: contenido en materia orgánica y nutrientes, estabilidad (biodegradabilidad) y madurez (fitotoxicidad), nivel de higienización y presencia de compuestos tóxicos e impurezas, y cuando el digestado las alcanza, se considera que este posee un potencial fertilizante y por lo tanto una utilidad en la agricultura [48].

La digestión anaerobia de la porquinaza es un proceso biológico que permite la estabilización de esta materia orgánica biodegradable, ya que es llevada hasta su máximo estado reducido – CH₄ – y oxidado – CO₂ - en el ciclo anaerobio del carbono, las evidencias de ello son la marcada reducción en la DQO y en el olor, lo cual, según Lansing S., et al (2010) [68] se debe a la captura de gas amonio y una reducida concentración de contaminantes orgánicos en el efluente.

Tabla 16. Comparación de la concentración de potasio total, carbono orgánico oxidable, fosforo total, nitrógeno total y relación C/N del influente y el efluente del sistema. (^a Las variables fisicoquímicas se realizan sobre base seca).

	Influente		Efluente	
	Promedio	d.e	Promedio	d.e
Potasio total (K ₂ O) ^a	0,081%	0,001	0,036%	0,0001
Carbono orgánico oxidable total ^a	0,44%	-	0,10%	-
Fosforo total (P ₂ O ₅)	0,065%	-	0,044%	-
Nitrógeno orgánico total (N total) ^a	0,11%	-	0,50%	-
Relación C/N	3,9	-	0,19	-
Cenizas	82,4 %	-	68,2 %	-

	Lodo	
	Promedio	d.e
Potasio Total (K ₂ O)	0,221 %	0,0004
Carbono orgánico oxidable total	32,3 %	-
Fósforo total (P ₂ O ₅)	3,298 %	-
Nitrógeno orgánico total (N total)	4,24 %	-

Relación C/N	7,60	-
Cenizas	82,7 %	-
CIC	32,3 meq/100 g	-
CIC/CO	187 meq/100 g CO	-
Humedad	6,4 %	-

En la Tabla 16, comparación de las variables fisicoquímicas del efluente, influente y lodo - se observa que la digestión anaerobia de la porquinaza genera una reducción en la concentración de potasio total, carbono orgánico oxidable y fosforo total, en contraste con un incremento en la concentración de nitrógeno orgánico total, esto se debe a que en la digestión anaerobia la fijación de este elemento nutritivo es escasa, no así el consumo de carbono [86], además el decrecimiento en la relación C:N implica una menor viscosidad, la cual reduce la inmovilización del N, incrementa la mineralización de este y la toma de N justo después de la aplicación, decrece la pérdida debido a la denitrificación y decrecen las emisiones de NH_3 debido al incremento en la infiltración en el suelo en comparación con el estiércol crudo [48]. El lodo de la digestión anaerobia, el cual es el grueso de la biomasa de interés para este proceso, posee una alta concentración de estos elementos, lo cual es lo esperado ya que están relacionados a los microorganismos que lo conforman.

De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana, NTC 5167 [38] en lo relacionado a los requisitos fisicoquímicos de fertilizantes orgánico – minerales líquidos, ni la porquinaza fresca ni la estabilizada se acercan a los valores mínimos requeridos de estos parámetros, por esta razón el efluente no es susceptible de ser ofrecido como fertilizante con un valor comercial, pero dentro de las explotaciones porcícolas puede ser usado para la fertilización de pastos mediante la dosificación – definir la cantidad de $\text{L Ha}^{-1} \text{Ciclo}^{-1}$ que deben ser aplicados.

Para los sistemas productivos cerdos – pasto – leche, el uso dado a la porquinaza, tal como ha sido planteado hasta el momento, es para la fertilización de pastizales de potreros dedicados al sostenimiento de bovinos. El principal requerimiento nutricional del pasto es el nitrógeno [34] y como se evidencia este elemento está más disponible luego

de la digestión anaerobia, así que es posible prever que el valor de la porquinaza como fertilizante no se pierde, sino que por el contrario puede ser potenciado.

En cuanto al lodo, este cumple los requisitos de humedad, carbono orgánico oxidable total, fosforo total, nitrógeno orgánico total, presentados por la norma para fertilizantes orgánico – minerales sólidos, excepto para potasio total el cual si es un valor bajo, pero este puede ser formulado con suplementos minerales, de acuerdo a lo anterior el lodo de la digestión anaerobia de la porquinaza tienen una alta riqueza nutricional, pero dado que las descargas de lodo del sistema son muy bajas no es posible realizar un ensayo para evaluar los efectos de su aplicación en pasto.

Los resultados microbiológicos presentados en la Tabla 17 indican que en comparación con la porquinaza fresca, la digestión anaerobia reduce la concentración de los diferentes microorganismos, siendo importante en lo referente a la concentración de entero bacterias y salmonela, este resultado da cuenta de que la aplicación del efluente o del lodo de la digestión anaerobia, por lo tanto no genera implicaciones sanitarias, como si ocurre con la aplicación de la porquinaza fresca.

Tabla 17. Características microbiológicas del influente, efluente y lodos de la digestión anaerobia de porquinaza.

	Influente	Efluente	Lodos
Mesófilos (UFC/g)	5,2 E+ 08	5,0E+07	-
Termófilos (UFC/g)	3,0 E + 07	1,0E+02	-
Mohos (UFC/g)	0,0 E + 00	0,0E+00	-
Levaduras (UFC/g)	3,3 E + 04	0.0E+00	-
Nematodos y/o protozoos	Ausentes	Ausentes	-
Entero bacterias (UFC/g)	2,0 E + 02	0,0E+00	0,0E+00
Salmonella (UFC/25 g)	Ausente	Ausente	Ausente

Los análisis del suelo presentados en la Tabla 18 en el cual se realizaron los ensayos para evaluar el potencial fertilizante de la porquinaza fresca y el efluente indican que esté de acuerdo con las recomendaciones del ICA posee una concentración baja de Ca, P y

S, concentración media de K y Mn, concentración alta de Mg, B, Fe, Cu y Zn, alta concentración de materia orgánica y un pH moderadamente ácido, además de ser un suelo franco, se concluye que este suelo se ajusta a los requerimientos para el crecimiento de este tipo de pasto de acuerdo a lo reportado en la ficha técnica de Corpoica.

Tabla 18. Características del suelo empleado para el ensayo.

pH	dSm-1	5,6
Materia Orgánica	%	7,9
Calcio	meq/100 kg	4,4
Magnesio	meq/100 kg	5,6
Potasio	meq/100 kg	0,34
Sodio	meq/100 kg	0,02
CICE	-	10,4
Fosforo	mg Kg ⁻¹	5
Azufre	mg Kg ⁻¹	6
Hierro	mg Kg ⁻¹	331
Manganeso	mg Kg ⁻¹	7
Cobre	mg Kg ⁻¹	7
Zinc	mg Kg ⁻¹	12
Boro	mg Kg ⁻¹	0.54

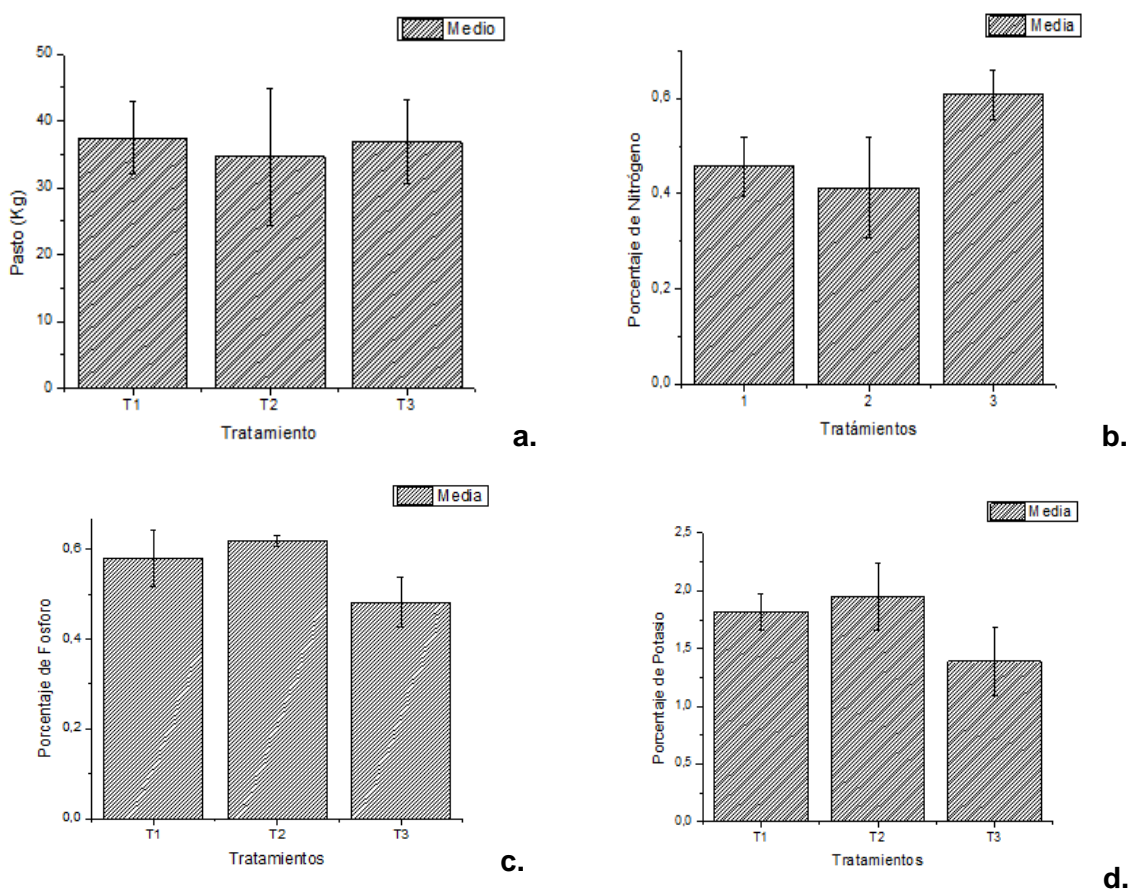
Con base en la anterior y los criterios exigibles de calidad del efluente, además de lo reportado en la literatura, se considera que este material puede suplir los requerimientos energéticos de un cultivo de pasto, evitando incurrir en impactos ambientales negativos o en inversiones económicas en la compra de fertilizantes para el sostenimiento de pasto y por lo tanto de ganado.

Adicionalmente, se realizó un ensayo en el cual se pretendía evaluar el impacto de la aplicación del influente y del efluente del sistema de tratamiento sobre un suelo sin plan de fertilización desde hace más de 5 años y que no se encuentra en condiciones

deficitarias ni de presión, el ensayo fue realizado de acuerdo a lo planteado en la metodología.

Se realizó un análisis considerando la comparación de cada una de las variables entre los tratamientos para evaluar si existen diferencias significativas.

Figura 24. Resultados de cada uno de los tratamientos T1: Efluente T2: Influyente. T3: Blanco, sobre cada una de las variables en pasto, a: Materia Húmeda, b: Nitrógeno, c: Fosforo, d: Potasio.



De acuerdo a la Figura 24, la aplicación del influente y del efluente de la digestión anaerobia no tienen impacto sobre la productividad del pasto – evaluada como materia húmeda - ya que no hay diferencia con respecto al control, los valores de la base de datos son similares, esto de acuerdo a lo esperado de cualquier sustrato empleado como fertilizante, es positivo, ya que no afectó la germinación ni generó toxicidad sobre el

pasto, es decir, que el tratamiento de mayor interés, el efluente de la digestión anaerobia, no afecta esta variable.

La concentración de los elementos mayores da idea del impacto de cada uno de los tratamientos sobre la calidad del pasto, para nitrógeno se encuentra que hay una mayor concentración N en el pasto del blanco; es de considerar que tanto el efluente como el influente poseen una carga microbiana importante y que son sustratos que poseen materia orgánica biodegradable – el influente posee una mayor concentración dado que el efluente paso por un tratamiento eficiente – y que al llegar al suelo esos microorganismos que no son estables consumen esa materia orgánica y nitrógeno, posiblemente el suministrado no solo por tratamientos sino el que se encontraba en el suelo, se encuentra que entre los dos tratamientos, T1 – efluente – es el que tiene mayor concentración de N en el pasto en comparación con T2. Para fósforo y potasio se encuentra que la concentración de los mismos en el pasto es mayor para las réplicas del tratamiento 2 – influente – esto se encuentra relacionado con la concentración de estos elementos asociadas a este tratamiento (0.065% de P. 0.081% K), ya que son superiores a las relacionadas al efluente. Finalmente, se debe considerar que el P y K tienen ese comportamiento ya que en su ciclo no hay un componente volátil, mientras que en el ciclo del nitrógeno su forma amoniacal se volatiliza.

Estos resultados indican que un solo ensayo no es concluyente respecto a los efectos de estos tratamientos sobre el pasto, ya que se realizó sobre un suelo que no ha sido sometido a planes de fertilización desde hace más de cinco años y adicionalmente no se encuentra bajo condiciones deficitarias tal como lo indica el resultado del análisis de suelo, además, no es posible indagar con certeza sobre las múltiples interacciones biológicas, físicas y químicas ocurridas.

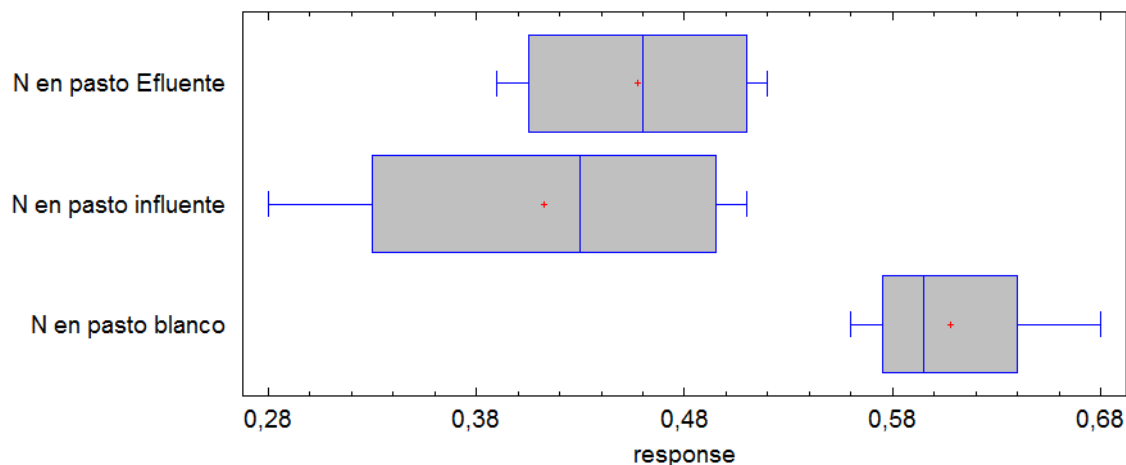
De igual manera es importante evaluar la significancia estadística de los resultados del ensayo, para esto se aplicó un ANOVA a los resultados, con un $n = 8$, evaluando homocedasticidad y normalidad empleando las pruebas de Levene y Shapiro – Wilk respectivamente, y considerando la prueba no paramétrica de Kruskal – Wallis, para los resultados que no cumplieran los supuestos para el ANOVA, se empleó el software Statgraphics Centurion y los resultados son presentados en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados del ANOVA para evaluar las diferencias estadísticamente significativas de cada una de las variables entre los tratamientos.

	ANOVA	Levene	Shapiro Wilk	Prueba de rangos múltiples (LSD)	Kruskal Wallis
Pasto	> 0.05	> 0.05	> 0.05	X	X
Nitrógeno en pasto	< 0.05	< 0.05	< 0.05	Influyente – Control Efluente – Control	< 0.05
Fosforo en pasto	< 0.05	> 0.05	> 0.05	Influyente – Control Efluente – Control	X
Potasio en pasto	< 0.05	> 0.05	> 0.05	Influyente – Control Efluente – Control	X

De acuerdo a los resultados del ANOVA, entre los tratamientos la variable pastos no presenta diferencias significativas, lo cual confirma lo presentado anteriormente. Con respecto a fosforo y potasio existen diferencias significativas entre los resultados de concentración de estos elementos en pastos sometidos a la aplicación de influente y efluente respecto al blanco, esto es lo esperado, que la aplicación de suplementos presente efectos sobre el calidad del pasto, en contraste con la no aplicación – blanco – resultado que fue discutido anteriormente. En cuanto a la concentración de nitrógeno, se obtuvo que estos resultados no siguen una distribución normal y por lo tanto se aplicó la prueba de Kruskal – Wallis, la cual confirma que existen diferencias significativas entre los tratamientos, y para determinar entre cuales tratamientos, se emplea un gráfico de cajas y bigotes presentado en la Figura 25.

Figura 25. Gráfico de cajas y bigotes para determinar la diferencia de la concentración de nitrógeno entre tratamientos



Del anterior gráfico, se encuentra que la diferencia existe entre influente y efluente con respecto al blanco pero este último es el que presenta una mayor concentración de nitrógeno, tal como se mencionó anteriormente, no es posible concluir sobre el efecto que está presentando los tratamientos sobre la calidad del pasto, ya que no es concluyente evaluar una única aplicación y no es posible definir cuáles sean los efectos de la interacción de los tratamientos en un suelo con las condiciones encontradas.

5.6 Evaluación del impacto ambiental.

Se realiza la propuesta para el tratamiento de la totalidad de la porquinaza generada en la granja de cerdos pre cebo de la empresa Supercerdo S.A y se evalúa el impacto ambiental asociado a la implementación de dicho sistema considerando el predio de la granja y los suelos para la aplicación del efluente del sistema.

5.6.1 Diseño y análisis del sistema de tratamiento.

El diseño del proyecto se realiza considerando los resultados fisicoquímicos y microbiológicos de la porquinaza de la empresa Supercerdo S.A, además se consideran los parámetros de operación estable del sistema de tratamiento de digestión anaerobia.

Descripción del proyecto.

Con base en las visitas realizadas al sistema porcícola, los muestreos y ensayos a escala de laboratorio se elabora la propuesta para el diseño del sistema de recuperación energética y material de porquinaza para la obtención de biogás y de un efluente con buenas características como fertilizantes. El sistema propuesto para el tratamiento consta de las siguientes etapas (Figura 26).

- Cribado y sedimentación.
- Reactor UASB
- Tanque by pass.
- Reactor FAFA.
- Almacenamiento de efluente
- Almacenamiento y limpieza de biogás.
- Compostera.

El biogás generado se propone que sea empleado para aprovechar la energía térmica en el calentamiento de los cerdos, ya que en la actualidad el sistema porcícola consume gas propano para este fin. Adicionalmente los sistemas de digestión anaerobia producen una cantidad de lodos baja, pero el monitoreo indicara el momento en el que deba ser realizada la purga en los reactores, actividad que es esporádica, pero estos lodos poseen un alto potencial fertilizante dadas las concentraciones de fosforo y también pueden ser aplicados en suelos de acuerdo a un plan de fertilización.

- Cribado y sedimentación: Esta unidad se emplea para la separación de sólidos de gran tamaño que puedan posteriormente obstruir las bombas o colmatar los reactores. La granja cuenta con un tanque estercolero de 15 m³ en el cual la porquinaza permanece aproximadamente 12 horas como tiempo de retención, por lo tanto, este tanque será empleado luego de ser modificado, construyendo un canal de tres pasos para forzar un flujo lento que permita la sedimentación, además la salida del tanque será modificada para que permita el flujo del líquido sobrenadante. El cribado se realiza empleando una malla de acero inoxidable instalada con un tamaño de poro de 2 mm y con un ángulo de 45°, además con unas agarraderas que permitan descargarla cada vez que esta se comience a colmatar. Para facilitar estas

modificaciones se considera incrementar la altura del tanque en por lo menos un metro. El flujo hacia esta unidad es garantizado por gravedad.

- Reactores UASB: Esta es la unidad fundamental del sistema, se considera usar cuatro reactores cada uno acompañado de una bomba ya que el flujo es ascendente. Las características de cada reactor son las presentadas en la Tabla 20.

Tabla 20. Características de los reactores UASB a ser empleados en la granja de cerdos pre cebos de Supercerdo S.A.

Caudal	L min ⁻¹	6,076
TRH	d	2
V up	m h ⁻¹	1,4
Volumen total	m ³	21,875
Altura total	m	7,263
Diámetro cilindro	m	1,832
Diámetro brazo	m	1,374
Longitud brazo	m	1,851

- Tanque By Pass: El objetivo del tanque es contar con un volumen disponible para la descarga total de algún reactor o del tanque Sedimentador o dada alguna falla en el sistema. El volumen total de este tanque es de 15 m³, con una profundidad de 3.6 m, ancho de 2,5 m y largo de 2 m.
- Reactor FAFA: El sistema cuenta con solo un reactor FAFA ya que este recibe un efluente mucho más depurado y por lo tanto puede alcanzar altos porcentajes de remoción en poco tiempo. Las características del reactor son las presentadas en la Tabla 21.

Tabla 21. Características del reactor FAFA a ser empleado en la granja de cerdos pre cebos de Supercerdo S.A.

Caudal	L min ⁻¹	24,306
TRH	D	0,5
V up	m h ⁻¹	0,321
Volumen total	m ³	21,875
Altura total	M	4,812
Diámetro cilindro	M	2,406
Volumen Zona empacada	m ³	15,313

La principal característica de este reactor es que requiere de un material de soporte que ocupa el 80% del volumen del reactor. El material propuesto es espuma de poliuretano, se emplean los sobrantes de las empresas productoras de este material. Para garantizar el flujo ascendente se requiere de una bomba.

- Almacenamiento de efluente: El efluente del sistema es almacenado en un tanque cuyo volumen es de 30 m³, 5 m de ancho, 3 m de profundidad y 2 m de largo, ya que el tiempo de almacenamiento depende del plan de fertilización. La aplicación del efluente requiere del bombeo o instalación del sistema para el riego. El uso del mismo depende de las necesidades del poricultor.
- Limpieza, almacenamiento y uso de biogás: Para la limpieza se emplean dos sistemas para retirar el H₂S y el agua que trae el biogás, además de un contador de biogás para el monitoreo del caudal producido. De acuerdo al rendimiento de biogás del sistema, la cantidad de animales y la carga orgánica, se espera una producción de biogás de 64 m³ d⁻¹, de los cuales, 48 m³ d⁻¹ son de metano. Por lo anterior el tamaño de la bolsa de almacenamiento recomendada es de 23 m de largo y 5 m de ancho. Como se evidencia, la cantidad del biogás empleada en la granja es poco, por lo tanto se sugiere el uso de un generador para la producción de energía eléctrica, la cual sería equivalente a 3695,757 KW-hr mes⁻¹, el cual puede ser reintegrado a la granja para suplir el consumo de energía eléctrica.

- Compostera: Para el tratamiento de los residuos sólidos separados en la fase de cribado, se diseña una compostera con un área de 10 m², en la cual se dispondrán filas de los materiales que serán previamente caracterizados para determinar necesidad de mezcla con otros de naturaleza diferente. La compostera requiere de techo ubicado a una altura de 3 m y una picadora con su respectiva conexión eléctrica.

El área total del proyecto es de 600 m², la cual se considera el área disponible justo después del tanque estercolero, la cual tiene una pendiente leve respecto a este tanque y favorece el flujo, adicionalmente, es seleccionada porque existe la disponibilidad de uso de este espacio.

El sistema en general requiere de un mortero, canaletas, acometidas eléctricas, sistema de distribución de agua y de la contratación de mano de obra para el montaje y un técnico para la operación y monitoreo de la planta, además de unas instalaciones mínimas de laboratorio para el análisis de muestras, el contrato con un laboratorio especializado para el análisis de parámetros físico químicos y microbiológicos más complejos, y contrato con una empresa para el mantenimiento de equipos.

Figura 26. Diagrama de la planta para la recuperación energética y material de porquinaza en la granja de cerdos pre cebo de la empresa Supercerdo S.A. (Línea azul continua: Fluido líquido. Línea verde discontinua: Biogás. Línea gris punteado: By pass)

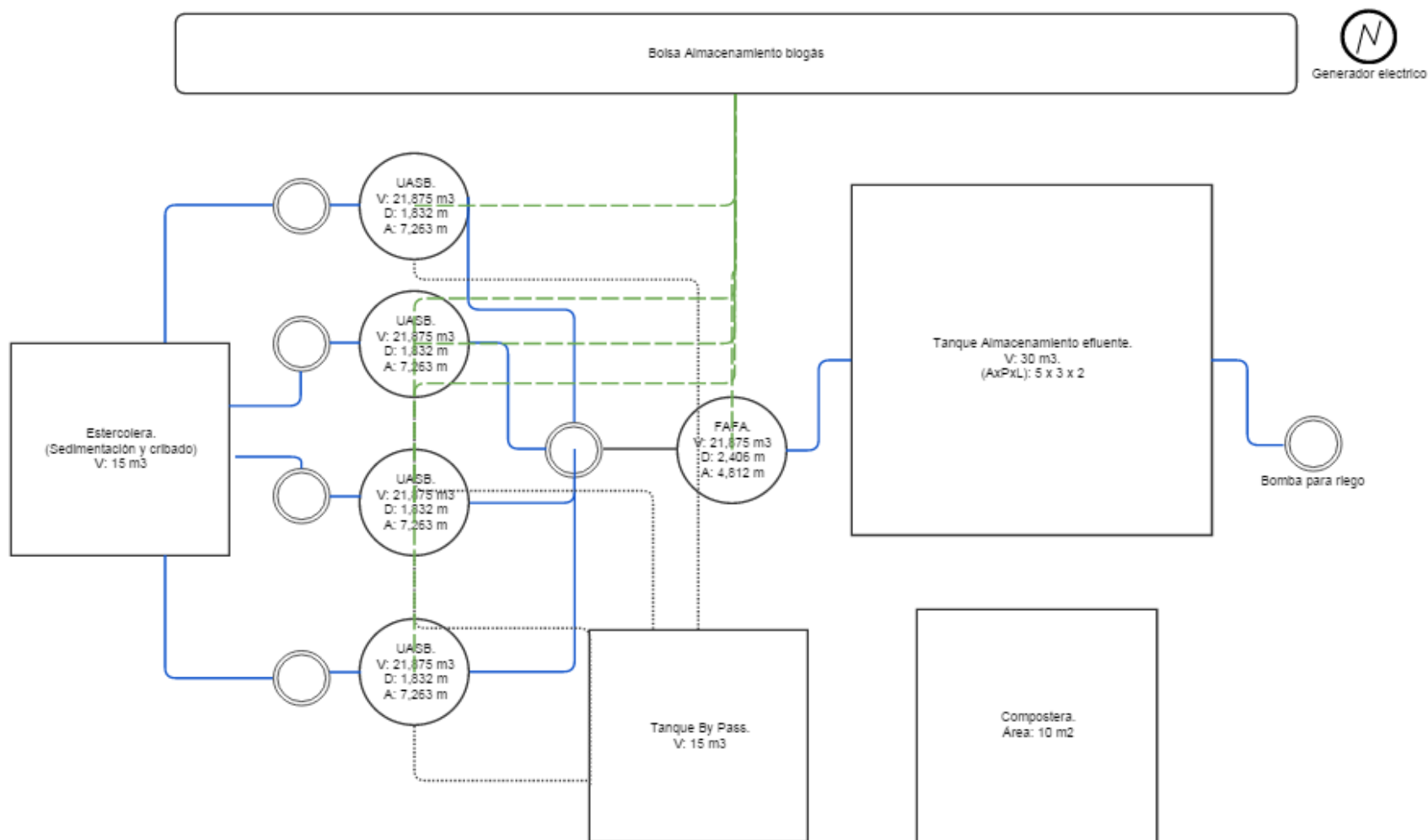


Figura 27. Sitio para la instalación del sistema de recuperación energética y material de porquinaza en la granja de cerdos pre cebo de la empresa Supercerdo S.A (Tomado de: Google Maps)



Los tanques serán construidos en fibra de vidrio, la tubería, válvulas y accesorios serán en PVC, las mangueras de material siliconado, el mortero en concreto con un reforzamiento de una malla de hierro para el soporte del peso. La compostera será construida en guadua con entechado de material plástico ya que favorece la retención de calor.

El sistema cuenta con seis bombas en la fase de funcionamiento, pero durante la construcción requiere de una retro excavadora y una mezcladora, además de los equipos requeridos para la conexión del sistema a la energía eléctrica y al sistema de agua. En esta fase puede existir riesgo de accidentes, pero que serán prevenidos con el suministro de la indumentaria necesaria. Durante la fase de construcción se cuenta con un espacio para la disposición de residuos, incluyendo los contaminados con materiales químicos.

Se considera que este proyecto contribuirá a mejorar el funcionamiento de la granja, ya que se auto abastecerá en términos energéticos, reducirá la emisión de olores y la atracción de plagas lo cual es favorable para los vecinos y los trabajadores de la planta, el suelo será regado con un material estabilizado y de buena calidad, aunque es posible que la cantidad de tanques del sistema generen cierto impacto visual sobre los pobladores.

El proyecto está dividido en fases, cada una de las cuales involucra una serie de actividades que son descritas en la Figura 28.

Figura 28. Identificación de las actividades asociadas a cada una de las fases del proyecto.

Fase	Actividad	Descripción
Fase Construcción	Excavaciones y disposición del suelo	Obras requeridas para la implementación del proyecto que impliquen la remoción de capas de suelo.
	Establecimiento de zonas de protección y distancias de retiros	Construcción de un canal para la recolección de aguas, dadas eventuales fallas en el sistema de tratamiento, descargas no previstas o accidentes que lleven al descargue parcial o total de alguna de las unidades, esto para proteger la fuente hídrica cercana a la instalación
	Construcción del Mortero	Construcción de la plataforma con las especificaciones de resistencia exactas para el soporte del peso del sistema, para evitar movimientos no deseados del suelo.
	Instalación de acometidas eléctricas y de agua	Conexión del sistema al servicio eléctrico para el funcionamiento eléctrico y acometidas de agua para lavado del área.
	Adecuación de zonas de disposición de residuos	Zona para acopio de los residuos generados por la construcción del sistema.
	Instalación tanques, bombas y tubería	Instalación de tanques, bombas y tubería en el sitio, implica los procesos de ajustes en el área de trabajo, construcción de sistemas de seguridad para garantizar estabilidad de los tanques y correcto funcionamiento de las bombas. Además, la tubería instalada es en PVC y el proceso de instalación genera residuos como estopas contaminadas con residuos químicos (solventes y pegas), se contara con un sistema de recolección y almacenamiento de los mismos, para disposición final con una empresa especializada en el manejo de estos residuos.
	Construcción e instalación del sistema de conducción efluentes	Construcción del sistema que permita la conexión del tanque de almacenamiento de efluente con la bomba para el riego en los potreros. La capacidad de la bomba y la cantidad de litros a esparcir por potrero será determinada de acuerdo al tipo de cultivo, hectáreas y ciclos de pastoreo. Además las mangueras para el riego serán instaladas garantizando que no existan fugas que alteren otros suelos o cultivos no considerados.

	Construcción e instalación del sistema de conducción y almacenamiento de biogás	Construcción del sistema de conducción, limpieza, almacenamiento, compresión y distribución del biogás para el aprovechamiento térmico en los galpones de la granja, esto se realiza siguiendo la Norma Colombiana para garantizar la seguridad en la instalación y por lo tanto minimizar posibles accidentes.
	Construcción e instalación Compostera	Construcción de un mortero con los respectivos canales para recolección de posibles lixiviados, el área de la misma corresponde a la exacta para el manejo de los sólidos producidos en el sistema.
	Construcción del entechado	Construcción del entechado del sistema para evitar corrosión de los tanques, fallo de bombas además de mitigar el impacto visual, y aunque los olores son bastante reducidos, esto evita que las corrientes de viento los arrastren hacia la zona residencial cercana.
Fase funcionamiento	Acondicionamiento del inoculo a la porquinaza	El 50% restante del volumen útil de los reactores de digestión anaerobia son cargados con porquinaza pre tratada y permanecen 24 horas en aclimatación. La porquinaza producida en este periodo es almacenada en el tanque estercolero que cuenta con la capacidad para retenerla.
	Puesta en marcha del sistema de pre tratamiento y digestión anaerobia	Comienza la operación en continuo con un TRH superior al ideal para evitar sobrecargas orgánicas del sistema, esta operación es controlada con el caudal de alimentación.
	Monitoreo del sistema de digestión anaerobia a escala industrial	Se realizan muestreos dos veces por semana de la relación AGV/Alc en los puntos de muestreo de cada reactor y la DQO en la entrada y salida de cada reactor, se monitorea la producción de biogás y el porcentaje de metano cuatro veces por semana, y se monitorea el porcentaje de sólidos en la salida de cada reactor una vez por semana. Las muestras para DQO, AGV/Alc y sólidos son tomadas en el sitio y transportadas de forma acorde al laboratorio del GIEM para análisis de las mismas.
	Limpieza y almacenamiento y uso térmico del biogás	El biogás es transportado por el sistema de conducción hacia el sistema de limpieza y luego el de almacenamiento de biogás. En la medida que la bolsa se va llenando, la presión dentro de la misma incrementa.
	Generación energía eléctrica	Con el uso del generados eléctrico y garantizando un flujo el biogás se hace pasar de acuerdo a los requerimientos de presión que tenga este, la energía generada se hace pasar al sistema de conexión eléctrica

		para el aprovechamiento en la granja.
	Generación energía térmica	Con el uso de lámparas de biogás, estas se instalan en los corralas con una chispa y se garantiza el flujo para el calentamiento de los animales.
	Aplicación de fertilizante líquido a suelos	En el momento en el que el tanque de almacenamiento de efluente se encuentre lleno y de acuerdo a la finalización del ciclo de pastoreo en los potreros, se inicia la operación de la bomba de riego.
	Limpieza del cribado del pre tratamiento (recolección de sólidos)	La malla del cribado tendrá un periodo de operación antes de saturarse con sólidos, la malla será fácilmente retirable por un operario y descargada en una carreta para ser trasladados a la compostera.
	Operación del compost	De acuerdo a la relación C:N del material, este es mezclado con el material seleccionado. Esta operación se realiza en la compostera, la cual cuenta con un tanque para la recolección de lixiviados el cual se encuentra conectado con el sistema de digestión anaerobia. Seguimiento de la temperatura y la humedad de las pilas de compost. Esto se realiza en sitio. En casos de reducción de la humedad las pilas deben ser rociadas con agua, pero si el sistema está bien operado, los requerimientos de agua son mínimos. Se realiza hasta que el compost este maduro
	Aplicación/uso del fertilizante sólido	De acuerdo a lo establecido en el plan de fertilización, se realiza la aplicación del mismo, con la garantía de aplicar al suelo y al cultivo la cantidad necesaria para evitar sobre nitrificación, encharcamiento o presencia de vectores.
	Mantenimiento de maquinaria y equipos	Corresponde a las labores de mantenimiento de bombas, lavado externo de tanques y en general de las instalaciones

5.6.2 Normas aplicables en el manejo de residuos en sistemas productivos porcícolas.

El Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, como organismo rector de la gestión ambiental, debe definir entre otros temas, instrumentos administrativos y mecanismos necesarios para prevenir y controlar factores de deterioro ambiental, a la vez que establecer mecanismos de concertación con el sector privado y los diferentes sectores productivos, con el fin de introducir la dimensión ambiental en sus diferentes actividades. La instalación de una porcícola no requiere de una licencia ambiental, pero debe solicitar los diferentes permisos ambientales para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales. En la Tabla 22 se relacionan algunas de las normas más importantes normas vigentes relacionadas con las actividades agropecuarias, teniendo en cuenta el tipo de impacto que pueden ejercer estas industrias en el entorno.

Tabla 22. Tabla resumen de la normatividad que se debe considerar para el montaje de una porcícola.

Normatividad	Año	Tema
Ley 23	1973	Norma que recogió los principios de la cumbre sobre medio ambiente humano y actúa como fundamento para la adopción y expedición del código de los recursos naturales y de protección al medio ambiente.
Decreto 2811	1974	Código de Recursos Naturales y de protección al Medio Ambiente. Estatuto que integra y sistematiza lo relativo a la biodiversidad, manejo, uso y administración de los recursos naturales renovables. Regula el desarrollo de las actividades económicas – productivas en los medios urbanos y rurales. Clasifica como bienes públicos de interés general para efectos de uso y aprovechamiento, el suelo, el agua, el aire, la flora y la fauna que hacen parte de los diversos ecosistemas existentes en territorio colombiano.
Decreto 1449	1977	Establece obligaciones a los propietarios de predios ribereños sobre vegetación protectora y conservación y aprovechamiento de las aguas.

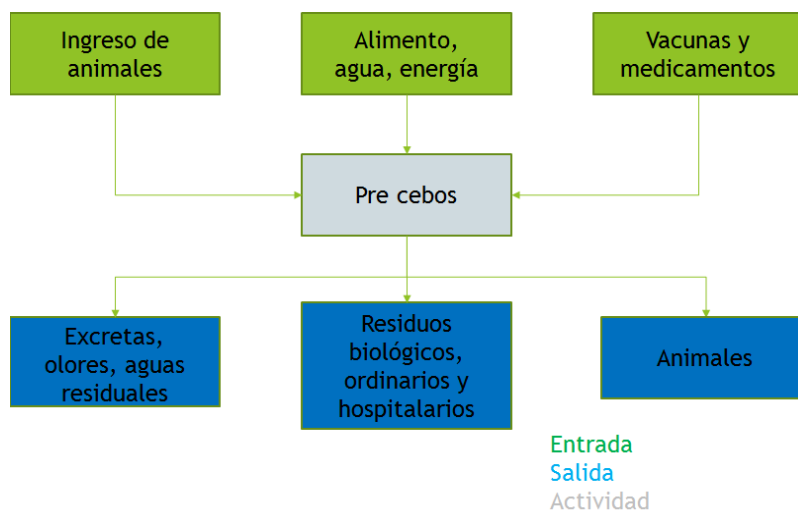
Decreto 1741	1978	Áreas de manejo especial
Decreto 1541	1978	Normas relacionadas con el recurso del agua y los recursos hidrobiológicos
Ley 9	1979	Código Sanitario Nacional. Uso de agua y vertimientos
Decreto 100	1980	Código penal colombiano. Art 205. Contaminación de aguas. Art 242. Aprovechamiento ilícito de recursos naturales.
Decreto 2858	1981	Aprovechamiento de aguas
Decreto 3489	1982	Declaración de emergencia en suministro de agua
Decreto 2104	1983	Residuos sólidos. Prohibición de disponer residuos en cuerpos de agua, disposición final de basuras al mar, control de lixiviados para evitar contaminación de aguas superficiales o subterráneas.
Decreto 1594	1984	Usos del agua y residuos líquidos. Estatuto que contiene lo relativo a la disposición de los vertimientos líquidos de origen residual, descargado en fuentes hídricas de uso público. Establece la norma de calidad ambiental del agua para efectos de garantizar su composición química y bacteriológica.
Res. 02309	1986	Residuos especiales
Constitución	1991	Arts. 78 – 82. Derechos colectivos y del ambiente
Ley 99	1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente y el SINA
Decreto 948	1995	Control de la calidad del aire. Olores ofensivos. Estatuto que establece lo relativo a las emisiones atmosféricas y al control de ellas y del ruido en las áreas urbanas, suburbanas y rurales.

Resolución 0154	1997	Se establecen los términos de referencia genérica para la elaboración del estudio del impacto ambiental.
Acuerdo 15 CAR	2000	Por medio de la cual se fija la meta de reducción de la carga de contaminación por vertimientos puntuales en las cuencas que hacen parte del territorio donde ejerce jurisdicción.

5.6.3 Línea base: Identificación del entorno en el que se desarrollara el proyecto.

Para identificar los impactos ambientales causados por la actividad porcícola y principalmente por la generación de porquinaza, se emplearon los diagnósticos ambientales sectoriales, la Guía Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y la biografía del sector, ya que obtener información detallada por parte del poricultor no fue posible y la granja de cerdos pre cebos no posee un estudio de impactos ambientales ni la identificación de planes de manejo. Con la información recolectada, se determinó el flujo de entradas y salidas y se establecieron los aspectos ambientales característicos de esta actividad productiva y sus impactos (Figura 29)

Figura 29. Entradas y salidas del sistema de producción porcícola de cerdos pre cebos.



Los contaminantes de este tipo de industrias son los olores, residuos biológicos, ordinarios y hospitalarios, las aguas residuales y las excretas de los animales, además

del consumo de recursos energéticos e hídricos, este sistema está cerca de la planta de sacrificio principal de Supercerdo S.A y de otras granjas dedicadas al levante y la cría de cerdos de otras edades, es decir, el entorno en el que se ubicara el proyecto de recuperación energética y material, es ya un entorno impactado, como será descrito posteriormente.

De acuerdo a las siguientes figuras se identifica la ubicación de la granja, la cercanía de esta con vías principales - Don Matías, Barbosa, Medellín – y la predominancia del sector rural, considerando que de acuerdo al POT del Municipio de Barbosa [84], esta área está destinada para explotación agrícola/agropecuaria. Es importante considerar que además de las explotaciones porcinas, también tiene presencia la empresa Biorganicos, especializada en la producción de fertilizantes orgánicos. La Figura 30 da cuenta del nivel de intervención que tiene el entorno dado que ha sido sometido a una serie de modificaciones ocasionadas por la industria, la construcción de vías y la ganadería. Además cerca de la granja se encuentra una fuente de agua superficial.

Figura 30. Ubicación general de la granja y su cercanía con vías de acceso principales.



La granja cuenta con una casa en la que habita el encargado junto con su familia, una oficina, un depósito para vacunas y medicamento, y otro para el almacenamiento del alimento, además de un área para limpieza y desinfección de los empleados. La granja cuenta con tres empleados, habitantes del municipio, un profesional en veterinaria y un auxiliar administrativo, estos últimos provenientes de otras regiones. El personal está

cubierto en prestaciones y cuentan con los materiales e insumos para protección personal.

La granja de cerdos pre cebos cuenta con cinco galpones, en los cuales rotan aproximadamente 5000 cerdos. Los animales son alimentados con alimento sintético y tiene un alto consumo de agua. Cada galpón cuenta con un espacio de 2 m³ promedio con una pendiente que permite la salida constante de la porquinaza hacia la estercolera con un caudal promedio de 20,8 L min⁻¹ por una tubería de 6". En los galpones también se realizan los procedimientos de vacunación y suministro de medicamentos.

Figura 31. Granja de explotación porcina de cerdos pre cebos.



La estercolera está cubierta por techo, pero no cuenta con paredes, lo que facilita la atracción de plagas y la presencia de larvas de moscos, además del arrastre de olores debido al viento, no cuenta con canaletas para prevenir derrames que puedan llegar a la fuente hídrica cercana. Dos veces al día – 6:00 am y 3:00 pm – la estercolera es descargada a corrales para la fertilización de pastos y alimento de ganado, esta práctica lleva desarrollándose durante varios años y no se realiza control de la misma, además de la dispersión de olores por estos predios. Investigaciones previas, que han sido referenciadas anteriormente, han demostrado que este tipo de prácticas pueden generar la sobre nitrificación de suelos, el encharcamiento, la presencia de plagas en esos suelos y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Figura 32. Estercolera con una capacidad de 15 m³ para la recolección de la porquinaza generada en el sistema y bomba para el riego de la porquinaza.



Lo anterior da cuenta del sistema en general, pero el interés se centra en el manejo de la porquinaza, para la cual se realiza un diagrama para identificar entradas y salidas, y por lo tanto los potenciales impactos (Figura 33)

Figura 33. Entradas y salidas del manejo de la porquinaza en la granja de cerdos pre cebos.



Figura 34. Matriz de identificación causa efecto de la producción porcicola.

Actividades	Impactos Ambientales															
	Medio Físico								Medio socio económico cultural							
	Medio Inerte				Biótico		Perceptual	Socio cultural			Económicos					
	Aire		Agua		Suelo		Flora	Fauna	Paisaje	Cultural	Humanos		Actividades Económicas	Empleo		
	Aire	Nivel de Polvo	Nivel de olores	Nivel de ruidos	Calidad de Agua	Recursos hídricos	Capacidad	Calidad/ Recursos	Densidad	Calidad	Abundancia	Paisaje			Estilo de vida	Calidad de vida
Limpieza y mantenimiento de instalaciones			X	X	X	X	X				X			X		X
Cría de cerdos		X	X	X	X	X	X			X	X			X		X
Prácticas de sanidad animal y seguridad			X											X		X
Manejo se porquinaza			X		X	X	X	X		X	X		X	X		

5.6.4 Previsión de los efectos que el proyecto generará sobre el medio.

Se desarrolla una primera aproximación al estudio de acciones y efectos. Se presenta un sucinto análisis de las acciones que debido a la ejecución del proyecto van a actuar sobre el medio, elaborando un listado de las mismas, y haciendo lo mismo para los factores del medio que pueden verse afectados por aquellas, plasmándolo igualmente en un inventario. (Anexo D).

5.6.5 Matriz de importancia.

A partir de esta fase comienza la preparación de la Valoración Cualitativa. Es una matriz de identificación – causa – efecto, la cual permite identificar, prevenir y comunicar los efectos del proyecto en el Medio, para posteriormente obtener una valoración de los mismos. En esta etapa es posible medir el impacto con base en el grado de manifestación cualitativa del efecto que quedará reflejado en lo que se define como la Importancia del Impacto o Índice de Incidencia. Cabe resaltar que los valores asignados para cada atributo, así como la importancia de cada factor, es decir, su peso o índice ponderal expresado en Unidades de Importancia (UIP), corresponden a criterio propio y a la consulta de varios profesionales de distintas áreas.

Con los valores de importancia total ponderada de los efectos causados a cada factor y de importancia total ponderada de los efectos debidos a cada actividad, se determinaron los factores más afectados y las actividades más impactantes, respectivamente.

En la Tabla 23 se presentan los valores de importancia ponderada para cada uno de los sistemas, subsistemas y componentes ambientales impactados por el proyecto. En general el Medio Físico recibe la mayor cantidad de impactos negativos con un total en la Importancia Total Ponderada de -132.3, mientras que para el Medio socio económico cultural este valor es de 743.5, es importante señalar que los impactos negativos están principalmente relacionados a la Fase de Construcción, ya que se desarrollan actividades que impactan de forma negativa los componentes tierra, aire y procesos del medio inerte, dado la excavación y remoción de suelo, la cual genera impactos permanentes sobre la estructura, calidad y capacidad, además de otros impactos como la emisión de ruidos, que son puntuales y efímeros al momento que se da la acción, pero que pueden tener

una intensidad alta. La matriz no refleja el nivel de impacto con el que ya cuenta el entorno, factores como el olor – componente aire – es significativamente mayor antes de la implementación del proyecto, pero durante el funcionamiento de este también existe una generación de olores, el cual no es el característico de la porquinaza y es de intensidad menor, esto se debe a que se cuenta con una línea base sin indicadores en la que solo se identifican los componentes impactados ya que como se planteó anteriormente no fue posible acceder a información de la porcicola, y por lo tanto a indicadores ambientales.

El Medio Socio económico cultural, es un medio que cuya calificación no es exacta, ya que depende de percepciones de las personas que realmente son impactadas por el proyecto, pero en las diferentes fases fue calificada con valores positivos ya que lo que se considera es que hay una reducción en los impactos negativos en términos de olores, plagas, paisaje, recreación, ocio, que para los pobladores y empleados es aceptable, el factor Aceptabilidad Social es el único que se considera en el componente Población, por esta razón, la importancia total ponderada es tan alta, ya que es claro que la reducción en los impactos ya existentes solucionará parte de las problemáticas generadas en la actualidad. Además, el proyecto genera empleos y para la industria se estima una mayor aceptación y en la fase de funcionamiento ganancias en términos económicos.

Tabla 23. Factores impactados por la implementación del sistema de tratamiento

Sistemas	Subsistemas	Componente	Importancia total Ponderada	Importancia Fase Construcción	Importancia Fase Funcionamiento
Medio Físico	Medio Inerte	Aire	-49,75	-23,25	-26,5
		Agua	-90,5	0	-90,5
		Tierra	-5,5	-62	56,5
		Procesos	-7,5	-16,67	9,17
	Biótico	Flora	42	-16	58
		Fauna	0	0	0
	Perceptual	Paisaje	-21	-59	38
Medio	Medio Rural	Recreativo	-19,00	-19,000	

Socio económico cultural		Productivo	33,00	-41,000	74,00
	Socio cultural	Humanos	6	30	-24
	Económico	Población	476	245	231
		Económico	247,5	96	151,5

En la siguiente tabla se presentan las actividades que generan impactos sobre el medio ambiente. Tal como fue evidenciado por los factores ambientales impactos, la fase de construcción es la que tiene relacionada la mayor cantidad de impactos negativos, siendo el subsistema más afectado el Medio Físico, la excavación y remoción del suelo es la actividad más impactante, ya que afecta directamente este recurso, genera erosión, polvo y ruido, además que deja un suelo sin posibilidad de ser usado en ganadería, agricultura o pastoreo, esta actividad no puede ser compensada pero si mitigada con un buen manejo del proceso, además su valor frente a los impactos positivos generados por la totalidad del proyecto, conducen a concluir que el proyecto debe ser realizado. Durante la fase de construcción se generan un sin número de residuos, por esta razón es uno de los impactos negativos más fuertes, pero este puede ser mitigado con la implementación de un plan de manejo que contemple la reducción de cantidades y la correcta disposición por medio de la contratación con empresas especializadas en el tratamiento de residuos generados en construcciones. La construcción e instalación de la geo membrana para el almacenamiento de biogás, es una actividad que implica la excavación de un área de 23 m de largo, 5 m de ancho y 5 m de profundidad, por esta razón es calificada negativamente ya que interviene altamente le componente suelo.

Es de resaltar los efectos positivos asociados a la generación de energía tanto térmica como eléctrica ya que se configuran no solo como ahorro para la granja, sino como un aporte al no agotamiento de los recursos al ser energías sostenibles, de igual manera, la importancia del impacto en lo que respecta a la aplicación de fertilizantes orgánicos, ya que son nutrientes que llegan al suelo de una forma estabilizada y disponibles para el uso de las plantas, en la cantidades requeridas para potencializar su calidad.

La importancia total de la fase de funcionamiento es positiva, ya que comienza a materializarse los beneficios económicos, paisajísticos, en reducción de olores y demás impactos ambientales negativos de los que hoy es objeto el agro ecosistema.

Tabla 24. Actividades impactantes de la implementación del sistema de tratamiento.

Fase	Actividad	Importancia Total	Importancia Medio Físico	Importancia Medio Socio económico cultural
Fase Construcción	Excavado y disposición del suelo	-91,833	-82,667	-9,167
	Establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros	-64,000	-49,667	-14,333
	Construcción de mortero	-41,08	-37,58	-3,50
	Instalación de acometidas eléctricas y de agua	16,83	-4,00	20,83
	Adecuación de zonas de disposición de residuos	-81,33	-52,67	-28,67
	Instalación de tanques, bombas y tubería	20,17	-22,50	42,67
	Construcción e instalación del sistema de conducción de efluentes	34,50		38,50
	Construcción e instalación del sistema de conducción y almacenamiento de biogás	-118,25	-60,00	-25,50
	Construcción e instalación compostera	40,67	-10,00	50,67
	Construcción de entechado	40,67	-10,00	50,67
	Transporte Inoculo	-16		-16
Fase Funcionamiento	Acondicionamiento del inoculo a la porquinaza	-11,5	-26	14,5
	Puesta en Marcha del	19,25	-14,25	33,5

	sistema de pre tratamiento y digestión anaerobia			
	Monitoreo del sistema de digestión anaerobia	-32	-33,5	1,5
	Limpieza y almacenamiento del biogás	-32,167	-20,667	-11,5
	Generación energía eléctrica	70,75	7,75	63
	Generación energía térmica	60,833	10,333	50,5
	Aplicación de fertilizantes líquido a suelos	148,417	60,417	88
	Limpieza del cribado del pre tratamiento	8,25	-17,25	25,5
	Operación de las pilas de compost	28,667	-11,333	40
	Aplicación de fertilizante sólido a suelos	148,417	60,417	88
	Mantenimiento de equipos	-12,25	-51,75	39,5

La EIA indica que el proyecto en términos ambientales es favorable para el agro ecosistema y que debe ser realizado ya que mitiga los impactos negativos actuales, aunque cabe señalar que la metodología para evaluar los impactos ambientales es aún muy subjetiva, si estos valores son modificados se podrían índices diferentes a los obtenidos en el presente análisis, sin embargo, los impactos asociados a una porcicola sin tratamiento de la porquinaza son significativamente mayores a los generados por las alternativas de tratamiento como la evaluada en esta investigación.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La digestión anaerobia de la porquinaza empleando un sistema de digestión anaerobia multi etapa operado en régimen continuo y a con temperatura de $25 \pm 4^\circ\text{C}$, permite tratar cargas orgánicas en el rango de $3.318 - 24,252 \text{ Kg DQO m}^3 \text{ día}^{-1}$, con un TRH de $1.496 - 2.160 \text{ d}$ y 0.4 d para el reactor UASB y el FAFA, respectivamente, alcanzando un porcentaje de remoción de materia orgánica del $89\% (\pm 7)$ y un rendimiento promedio de biogás de $0.723 \text{ L biogás L reactor}^{-1} \text{ d}^{-1}$ con un porcentaje de metano del 75% .

El diseño del sistema de digestión anaerobia multi etapa (UASB – FAFA) permite conservar la biomasa activa dentro de los reactores y luego de alcanzar la operación estable, soporta choques de carga orgánica y cambios en la operación sin afectar la eficiencia del tratamiento.

La digestión anaerobia es un proceso de estabilización de la porquinaza que arroja un efluente con olor reducido, con mayor porcentaje de nitrógeno, menor relación carbono: nitrógeno, ausencia de entero bacterias y *Salmonella sp.*, que puede ser dosificado y aplicado como fertilizante de pastizales para el alimento de ganado lechero.

La implementación del sistema de tratamiento propuesto adiciona valor a la porquinaza y trae beneficios ambientales al agroecosistema, la recuperación energética y material es una alternativa para el avance de los sistemas porcolos hacia sistemas productivos de base agroecológica.

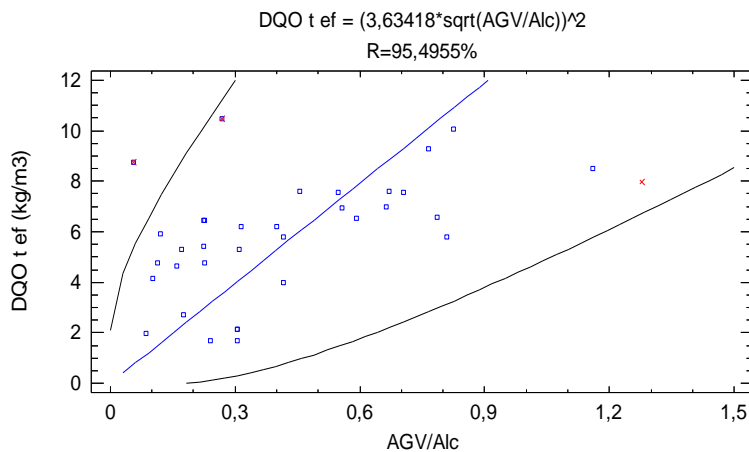
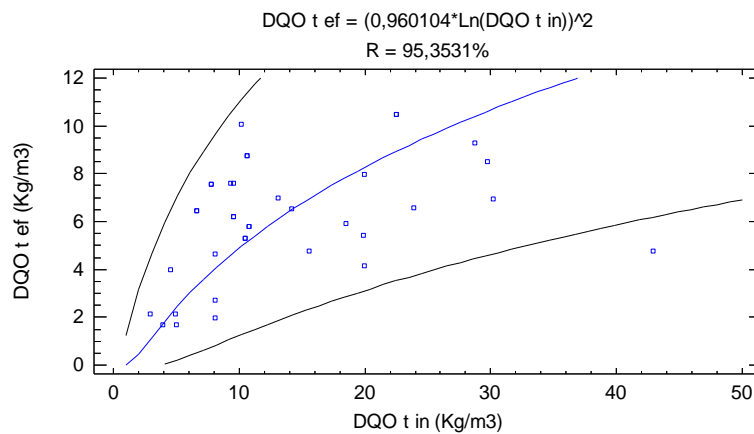
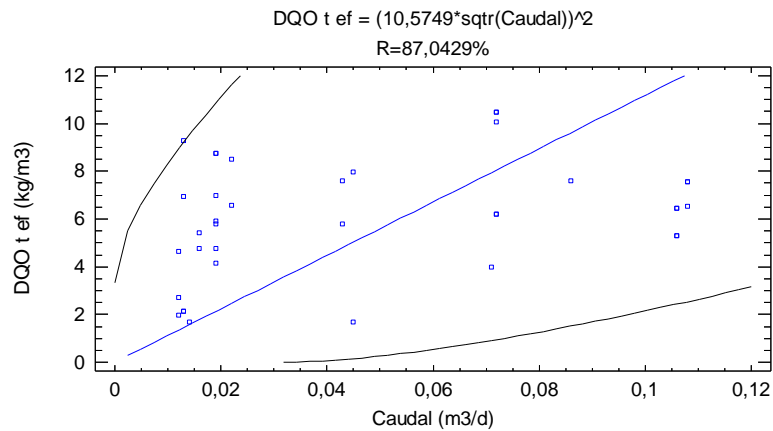
6.2 Recomendaciones

Los resultados sugieren que incrementar el número de reactores UASB dispuestos en paralelo y conectados en serie con un reactor FAFA puede incrementar la capacidad de volumen de porquinaza a ser tratada, ya que el reactor UASB posee una alta capacidad de remoción de carga orgánica y el efluente que entrega se encuentra muy depurado e hidrolizado, por lo que no se aprovecha la capacidad total de tratamiento que posee el FAFA.

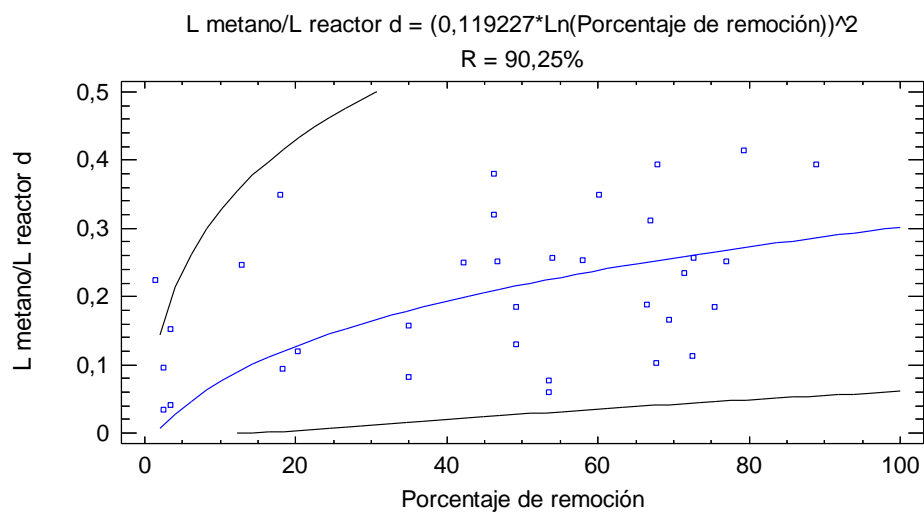
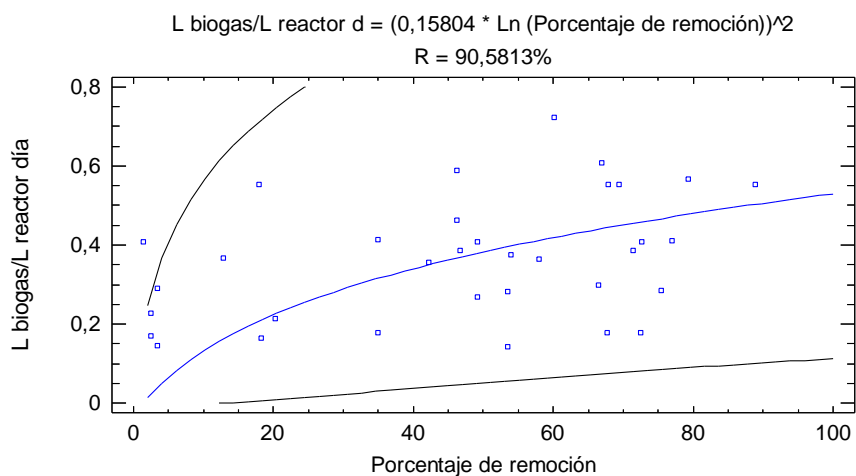
Una correcta evaluación del potencial fertilizante del efluente del sistema de digestión anaerobia debe ser realizada con varias repeticiones de los ensayos, ya que los procesos que ocurren en el suelo no se manifiestan claramente con una sola aplicación.

Es importante que las producciones porcinas sean susceptibles de licencia ambiental ya que estimularía la transición hacia sistemas productivos ambientalmente planificados y por lo tanto la reducción de la presión sobre el ecosistema.

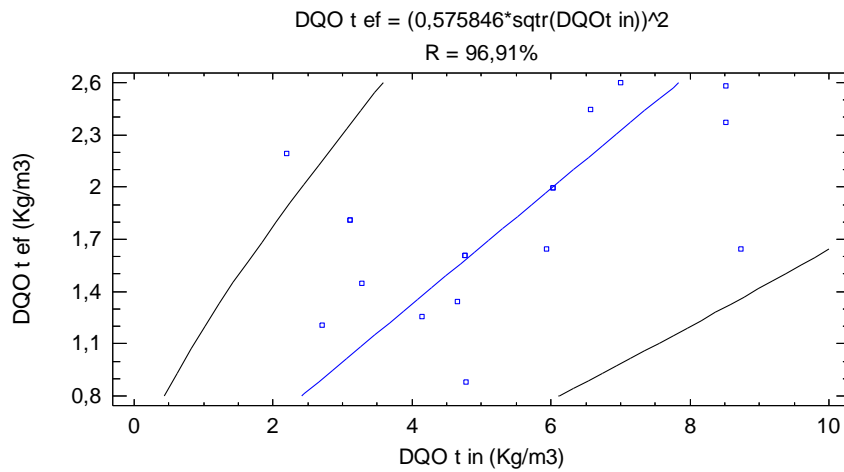
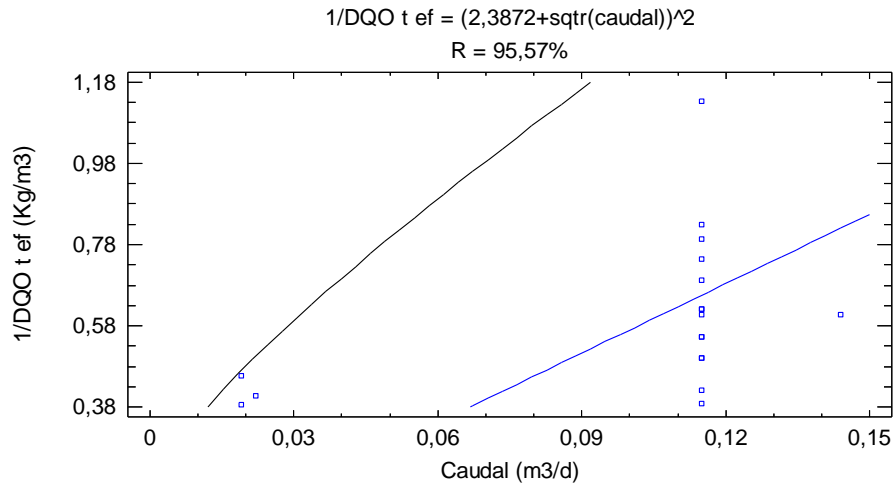
Anexo A: Efecto de las variables hidráulicas, orgánicas y de estabilidad sobre la DQO t del efluente del reactor UASB.



Anexo B: Relación del porcentaje de remoción de materia orgánica con el rendimiento de biogás de acuerdo al volumen del reactor.



Anexo C: Efecto de las variables hidráulicas y orgánicas sobre el porcentaje de remoción en el FAFA.



Anexo D: Matriz de importancia del proyecto del sistema de tratamiento por digestión anaerobia de la porquinaza generada en la granja de cerdos pre cebo de Supercerdo S.A.

[..\Evaluación del impacto ambiental\Anexos tesis\EIA Digestión anaerobia de porquinaza.xlsx](#)

Bibliografía

- [1] Guía Ambiental para el sub sector porcicola. Ministerio del Medio Ambiente. Sociedad de Agricultores de Colombia. Dirección General Ambiental Sectorial. (2002).
- [2] McCaskey, A.T. (1990). Microbiological and chemical pollution potential of swine waste. En memorias del primer ciclo internacional de conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdos. CINVESTAV. Congreso llevado a cabo en Guadalajara, México.
- [3] Mohedano, R, Costa, R., Tavares, F., Filho, P. (2012). High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full - scale duckweed ponds. *Bioresource Technology*, 112. 98 - 104.
- [4] Sánchez, E., Monroy, O., Cañizares, R., Travieso, L., Ramos, A. (1995). Preliminary study of piggery waste treatment by an Upflow sludge bed anaerobic reactor and a packed bed anaerobic reactor. *Journal agronomic engineering resource*. 62. 71 - 76.
- [5] Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., Colmenarejo, M. (2005). Effect of influent substrate concentration and hydraulic retention time on the performance of down - flow anaerobic fixed bed reactors treating piggery wastewater in a tropical climate. *Process Biochemistry*. 40. 817 – 829

- [6] K.V., Liao P.H., Gao Y.C. (1994). Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors. *Bioresorce Technology*. 47. 153 – 157
- [7] Boopathy, R. (1991). Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors. *Bioresource Technology*. 64. 1 – 6
- [8] Huang, J., Wu, C., Chen, C. (2005). Microbial activity in a combined UASB - activated sludge reactor system. *Chemosphere*. 61. 1032 - 1041.
- [9] Molina, K., Caicedo, L., Duque, C. (2008). Tratamiento de las excretas de cerdo mediante un reactor anaeróbico SCFBR a nivel de banco. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 7 - 15.
- [10] Hashimoto, A.G. (1983). Methane from swine manure: effect of temperature and influent substrate concentration on kinetic parameter (K)*. *Agricultural Wastes*. 9. 299 – 308
- [11] Faith, M., Rivas, O. (2012). Obtención de un mejorador de suelos como subproducto de la digestión anaerobia de desechos orgánicos en el TEC. *Tecnología en Marcha*. 25 (3). Julio - Septiembre.
- [12] Garfí, M., Gelman, P., Comas, J., Carrasco, W., Ferrer, I. (2011). Agricultural reuse of the digestate from low - cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*. 31. 2584 - 2589.
- [13] Day, D. (1987). Management swine waste. Asociación de Médicos Veterinarios Especialistas en Cerdos. Acapulco, Gro., México.
- [14] Seghezze, L., Zeeman, G., van Lier, J., Hamelers, H.V.M., Lettinga, G. (1998). A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactor. *Bioresource Technology*. 65. 175 - 190.

- [15] Singh, R.P., Kumar, S., Ojha, C.S.P. (1998). A critique on operational strategies for start - up of UASB reactors: effects of sludge loading rate and seed/biomass concentration. *Biochemical Engineering Journal*. 1. 107 – 119
- [16] Abbasi, T., Tauseed, S.M., Abbasi, S.A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16. 3228 – 3242
- [17] Nizami, A.S., Murphy, J.D. (2010). What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(6), 1558 – 1568
- [18] Muhammad, A.L., Ghufuran, R., Wahid, Z. A., Ahmad, A. (2011). Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters. *Water Research*. 45. 4683 – 4699
- [19] Chong, S., Sen, T., Kayaalp, A., Ang, H. (2012). The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A state - of - the - art review. *Water Research*, 46, 3434 – 3470
- [20] Tauseef S.M., Abbasi T., Abbasi S.A. (2013). Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and sustainable energy Reviews*. 19. 704 -741
- [21] Leitao, R.C., Santaella, S.T., van Haandel, A.C., Zeeman, G., Lettinga, G. (2011). The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. *Water Science & Technology*. 64. 9.
- [22] Cavalcanti, P., Souto, E., Menezes, J., van Haandel, A. (1999). Excess sludge discharge frequency for UASB reactors. *Water Science and technology*, 40(8) 211 – 219

- [23] Bruno M., De Oliveira R.A. 2008. Tratamento anaeróbico de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reactores UASB em dois estágios. *Eng. Agric., Jaboticabal*. 28 (2) 364 - 377.
- [24] Singh, S.P., Prerna, P. (2009). Review of recent advances in anaerobic packed - bed biogas reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13. 1569 – 1575
- [25] Kennedy, K.J., van den Berg, L. (1982) Continuous vs slug loading of downflow stationary fixed film reactors digesting piggery waste. *Biotechnology Letters*, 4 (2) 137 - 142.
- [26] Rajakumar, R., Meenambal, T. (2008) Comparative study on start - up performance of HUASB and AF reactors treating poultry slaughterhouse wastewater. *Int. J. Environ. Res*, 2 (4). 401 - 410.
- [27] Kang, H., Moon, S., Shin, K., Park, S. (2003). Pretreatment of swine wastewater using anaerobic filter. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 109. 117 - 126.
- [28] kashyap, D.R., Dadhich, K.S., Sharma, S.K. (2003). Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. *Bioresource Technology*. 87. 147 – 153
- [29] Sánchez, S., Hernández, M., Ruz, F. (2011). Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y Forrajes*, 34 (4). 375 – 392.
- [30] Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., Colmenarejo, M.F. (2005). Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary up flow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology*. 96. 335 – 344

- [31] Kim, W., Shin, S., Cho, K., Lee, C., Hwang, S. (2012). Performance of methanogenic reactors in temperature phased two - stage anaerobic digestion of swine wastewater. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 114 (6) 635 – 639
- [32] Bortone, G. (2009). Integrated anaerobic/aerobic biological treatment for intensive swine production. *Bioresource Technology*. 100. 5424 – 5430
- [33] Tambone, F., Barbara, S., Giuliana, D., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., Adani, F. (2010). Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*. 81. 577 – 583
- [34] ABOCOL (2014) Plan integral de nutrición lechería. Colombia. Recuperado de <http://www.abocol.com>
- [35] APHA 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edn. EUA. American Public Health Association, Washington D.C.
- [36] ICONTEC. Norma Técnica Colombia 370. Abonos o fertilizantes. Determinación del nitrógeno total.
- [37] ICONTEC. Norma Técnica Colombia 234. Abonos o fertilizantes. Método de ensayo para la determinación cuantitativa del fosforo
- [38] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores del suelo
- [39] González, C., León, C., García, P. (2008). Different pretreatment for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure. *Bioresource Technology*. 99. 8710 - 8714

- [40] Labatut, R., Angenent, L., Scott, N. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Biochemical Technology*. 102. 2255 - 2264.
- [41] Owen, W., Stuckey, D., Healy, J., Young, L., McCarty, P. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*. 13. 485 – 492
- [42] Show, K.Y., Wang, Y., Foong, S.F., Tay, J.H. (2004). Accelerated start - up and enhanced granulation in up flow anaerobic sludge blanket reactors. *Water Research*. 38. 2293 – 2304
- [43] Chad, J., Will, R., Fults, L., Hamilton, D. (2013). Forage and tree seedling growth in a soil with an encased swine sludge layer. *Journal of Environmental Management*. 128. 586 – 593
- [44] Yan, Y.G., Tay, J.H. Characterization of the granulation process during UASB start-up. *Water research*. 31 (1) 573 - 1580.
- [45] Wilkie, A., Collieran, E. (1984). Start - up of anaerobic filters containing different support material using pig slurry supernatant. *Biotechnology Letters*. 6 (11) 735 – 740
- [46] Lahav, O., Morgan, B. (2004). Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 79 (12) 1331 – 1341
- [47] Ferrer, I., Garfi, M., Uggetti, E., Ferrer – Martí, L., Calderón, A., Velo, E. (2011). Biogas production in low - cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*. 35. 1668 – 1674

- [48] Rao, J., Watabe, M., Stewart, T., Millar, B., Moore, J. (2007). Pelleted organo - mineral fertilizers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands. *Waste Management*. 27. 1117 – 1128
- [49] Cheng, H., Xu, W., Liu, J., Zhao, Q., He, Y., Chen, G. (2007). Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turgrass growth. *Ecological Engineering*. 29. 96 – 104
- [50] Loria, E.R., Sawyer, J.E. (2005). Extractable soil phosphorus and Inorganic Nitrogen following application of raw and anaerobically digested swine manure. *Reproduced from Agronomy Journal. Published by American Society of Agronomy*. May 13.
- [51] Bernal, J., Espinosa, J. (2003) IPNI. International Plant Nutrition Institute. Manual de nutrición y fertilización de pastos.
- [52] CORPOICA. Universidad Nacional de Colombia. (2013). Ficha técnica *Cynodon nlemfuensi*. Pasto estrella, Tumbaviejos.
- [53] Ministerio de agricultura y ganadería. Servicio Nacional de Salud Animal. Programa de investigación y transferencia tecnológica en cerdos. Fundación Swisscontact. (2010). Tecnologías sostenibles para el manejo de remanentes en granjas porcinas.
- [54] Kennedy K.J., Droste R.L. (1984). Startup of Anaerobic Down flow Stationary Fixed Film (DSFF) reactors. *Biotechnology and Bioengineering*. XXVII. 1152 – 1165
- [55] Asociación Colombiana de Porcicultores. Corporación Autónoma Regional Rionegro - Nare. CORNARE. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. CORANTIOQUIA. Ministerio del Medio Ambiente. (1996). Convenio de concertación para una producción más limpia entre el sector porcícola y ambiental

del departamento de Antioquia. Manejo de elementos de la producción porcina que pueden causar efecto ambiental.

- [56] Espinoza, G., Alzina, V. (2002). Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo BID. Centro de estudios para el desarrollo CED. Santiago de Chile - Chile.
- [57] Decreto 2820 de 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 05 de Agosto de 2010. "Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales"
- [58] Chami, R., Ramos, C. (2011). Factors in the determination of methanogenic potential of manure. *Bioresource technology*. 102. 7673 – 7677
- [59] Machado, E.M., Robayo, Y., Ayala H., Chávez Porras A. Plan de Manejo Ambiental para un proyecto porcícola. Estudio de Caso: Proyecto la Zambra, Otanche, Boyacá.
- [60] Pinos, J.M., García, J.C., Peña, L., Rendón J. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América.
- [61] Fernández, B., Porrier, P., Chamy, C. (2001). Effect of inoculum - substrate ratio on the start - up of solid waste anaerobic digesters. *Water Science Technology*. 44 (4) 103 - 108.
- [62] Gopalan, P., Jensen, P., Batstone, D. (2013). Anaerobic digestion of swine effluent: Impact of production stages. *Biomass and Bioenergy*. 48. 121 - 129.
- [63] González, C., Nieto, P., León, C., García, P. (2008). Solids and nutrients removals from the liquid fraction of swine slurry through screening and flocculation treatment and influence of these processes on anaerobic biodegradability. *Bioresource Technology*. 99. 6233 - 6239.

- [64] Sánchez, E., Travieso, L., Weiland, P., Borja, R., Nikolaeva, S. (2002). Effect of influent strength changes on the performance of a down - flow anaerobic fixed bed reactor treating piggery waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 36. 73 – 82
- [65] Sorensen, P., Amato, M. (2002). Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. *European Journal of Agronomy*. 16. 81 – 95
- [66] Fernández, C., (2010), *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. 4a Edición. Ediciones Mundi - Prensa.
- [67] Rodríguez, S. (2003). Utilización de los lodos anaerobios como bioabonos. *Agricultura Orgánica*. 1. 19 – 21
- [68] Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R., Nogueira da Silva T., Dias da Silva E. (2010). Wastewater transformation and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking in low- cost digesters. *Biomass and Bioenergy*. 34. 1711 – 1720
- [69] Hashimoto, A.G., (1989). Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw. *Biol. Waste*. 28. 247 – 255
- [70] Massé, D.I., Croteau, F., Masse, L. (2007). The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*. 98. 2819 – 2823
- [71] Luna del Risco M.A., Dubourguier, H. (2010). A web-based database on methanogenic potential of crop and wastes. *Environ. Modell. Softw*. 8. 970 - 971.
- [72] González, C., García, P. (2009). Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry. *Biomass and Bioenergy*. 33. 1065 – 1069

- [73] Lomas, J.M., Urbano, C., Camarero, L. (1999). Evaluation of a pilot scale downflow stationary fixed film anaerobic reactor treating piggery slurry in the mesophilic range. *Biomass and Bioenergy*. 17. 49 – 58
- [74] Kalyuzhnyi, S.V., Sklyar, V.I., Davlyatshina, M.A., Parshina, S.N., Simankova, M.V., Kostrikina, N.A., Nozhevnikova, A.N. (2011). Organic removal and microbiological features of UASB - reactor under various organic loading rates. *Bioresource Technology*. 55. 47 – 54
- [75] Möller, K., Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng. Life. Sci.* 12 (3) 242 – 257
- [76] Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 99. 4044 – 4064
- [77] Song, M., Shin, S.G., Hwang, S. (2010). Methanogenic population dynamics assessed by real - time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating. *Bioresource Technology*. 101. 533 – 538
- [78] Rodríguez, DC, Belmonte, M., Peñuela, G., Campos, JL., Vidal G. (2011). Behaviour of molecular weight distribution for the liquid fraction of pig slurry treated by anaerobic digestion. *Environmental Technology*. 32. 419 – 425
- [79] K. V. Lo., Liao P.H., Gao Y.C. (1994). Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors. *Bioresource Technology*. 47. 153 – 157
- [80] Lettinga G., Hulshoff Pol., L. W. (1991). UASB - process desing for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*. 24 (8). 87 – 107
- [81] Show K.Y., Tay J.H. (1998). Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters. *Water Research*. 33 (6). 1471 – 1481

- [82] Hill D.T, Bolte J.P. (2000). Methane production from low solid concentration liquid swine waste using conventional anaerobic fermentation. *Bioresource Technology*. 74. 241 – 247
- [83] Soria M. J., Ferrera R., Etchevers J., Alcántar G., Trinidad J., Borges L., Pereyda P. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamericana*. 19 (004). 353 – 362
- [84] Municipio Barbosa - Antioquia. Plan Básico de Ordenamiento Territorial 2012 - 2014. Diagnostico P.B.O.T
- [85] Kunz A., Miele M., Steinmetz R.L.R. (2010) Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. *Bioresource Technology*. 100. 5485 – 5489
- [86] Deng L., Li Y., Liu G., Yang H. (2014). Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation. 114. 504 - 511