



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



Universidad Nacional Autónoma De México

Facultad De Estudios Superiores Zaragoza

CARRERA DE BIOLOGÍA

Diseño, construcción y establecimiento de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales derivadas de una granja porcícola, en el municipio de Apaxtla de Castrejón Guerrero.

Tesis
Para Obtener El Título De

Biólogo

Presentan:

**NEFTALÍ BONFIL CASTRO
JOSÉ RAZIEL VALENCIA LIRA**

**Director de Tesis:
M. en C. Eliseo Cantellano De Rosas**

México D.F

Octubre de 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE	Pág.
1. Resumen _____	- 1 -
2. Introducción _____	- 2 -
3. Marco Teórico _____	- 4 -
3.1 Contexto general del agua en México _____	- 4 -
3.2 Porcicultura y aguas residuales _____	- 7 -
3.3 Tratamiento de aguas residuales en México _____	- 13 -
3.4 Biodigestores _____	- 21 -
3.5 La digestión anaerobia _____	- 30 -
3.6 Diseño _____	- 35 -
3.7 Participación social _____	- 37 -
4. Zona de Estudio _____	- 40 -
5. Hipótesis _____	- 46 -
6. Objetivos _____	- 47 -
7. Materiales y Métodos _____	- 47 -
8. Resultados _____	- 49 -
8.1 Análisis y discusión _____	- 57 -
8.2 Manual _____	- 57 -
9. Conclusiones _____	- 106 -
10. Recomendaciones _____	- 109 -
11. Bibliografía _____	- 110 -

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Generación, colecta, tratamiento y rehúso de las aguas residuales en centros urbanos y usos no municipales _____	- 6 -
Tabla 2. Contaminación producida en explotaciones porcinas _____	- 9 -
Tabla 3. Recursos presentes en los desechos porcinos _____	- 10 -
Tabla 4. Producción de heces y orina en cerdos por cada 100 Kg de peso vivo _____	- 12 -
Tabla 5. Procesos de tratamiento empleados en México _____	- 15 -
Tabla 6. Rendimientos de eliminación, en el tratamiento primario convencional y avanzado _____	- 19 -
Tabla 7. Tipos de digestores anaeróbicos _____	- 25 -
Tabla 8. Variación de energía libre en la metanogénesis _____	- 35 -
Tabla 9. Procedimientos analíticos _____	- 48 -
Tabla 10. Caracterización del agua residual de la granja _____	- 49 -
Tabla 11. Caracterización del efluente del biodigestor I _____	- 57 -
Tabla 12. Caracterización del efluente del biodigestor II _____	- 57 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Proceso de degradación de la materia orgánica en ambientes anóxicos _____	- 28 -
Figura 2. Esquema básico de un biodigestor _____	- 35 -
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio _____	- 42 -
Figura 4. Construcción de la canaleta de contención _____	- 51 -
Figura 5. Instalación de la válvula de salida del biogás _____	- 53 -
Figura 6. Instalación del biodigestor _____	- 54 -
Figura 7. Amarres con las cámaras de llantas, _____	- 54 -
Figura 8. Introducción del inóculo de estiércol de res al biodigestor _____	- 55 -
Figura 9. Salida del sistema _____	- 56 -

ÍNDICE DE GRÁFICAS	Pág.
Gráfica 1. DQO-DBO biodigestor I _____	- 61 -
Gráfica 2. DQO-DBO biodigestor II _____	- 61 -
Gráfica 3. Sólidos Totales _____	- 62 -
Gráfica 4. Sólidos Disueltos Totales _____	- 63 -
Gráfica 5. Sólidos Disueltos Totales Fijos _____	- 63 -
Gráfica 6. Sólidos Disueltos Totales Volátiles _____	- 64 -
Gráfica 7. Sólidos Suspendidos Totales _____	- 65 -
Gráfica 8. Sólidos Suspendidos Totales Volátiles _____	- 65 -
Gráfica 9. Sólidos Suspendidos Totales Fijos _____	- 65 -
Gráfica 10. Nitritos _____	- 68 -
Gráfica 11. Nitratos _____	- 67 -
Gráfica 12. Nitrógeno orgánico _____	- 67 -
Gráfica 13. Nitrógeno Amoniacal _____	- 69 -
Gráfica 14. Nitrógeno total Kjendahl _____	- 69 -
Gráfica 15. Fósforo Ortosoluble _____	- 72 -
Gráfica 16. Fósforo Hidrosoluble _____	- 72 -
Gráfica 17. Fósforo Total _____	- 73 -
Gráfica 18. Coliformes Fecales _____	- 74 -
Gráfica 19. Grasas y Aceites _____	- 75 -

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

NEFTALÍ BONFIL CASTRO

Aún recuerdo aquel día en el cual empaque mi maleta llena de ilusiones y con lágrimas en los ojos me embarque en un viaje el cual cambiara mi vida por completo, me fui con rumbo a un lugar completamente desconocido para mí, sin saber lo que me esperaba, sin embargo nunca imagine lo que realmente aprendería y viviría al lado mis compañeros y maestros, los cuales con el paso del tiempo se convirtieron en amigos entrañables y unas personas muy importantes en mi vida, tanto académica como personal, son innumerables los recuerdos que vienen a mi mente al recordar esta etapa tan maravillosa en mi vida y una sonrisa se dibuja tiernamente en mi rostro, solo me resta agradecerles por haber compartido todos estos momentos conmigo, tanto buenos como malos, estando siempre apoyándome y alentándome a salir adelante, es un orgullo pertenecer a esta maravillosa universidad, la cual fue mi hogar durante todo este tiempo, donde mis amigos y maestros se convirtieron en parte de mi familia y como dice aquel dicho “Se sufre pero se aprende”, este no es el final, tan solo es el inicio de una vida llena de triunfos y de nuevos retos, donde la vida nos depara un camino lleno de sorpresas, pero teniendo siempre en cuenta de dónde venimos y hacía donde nos dirigimos.

Primero que nada quiero agradecerle a Dios y a la vida por haberme puesto en este camino, por haberme dado un par de padres maravillosos, los cuales me enseñaron a ser un hombre de bien, predicando siempre con el ejemplo, los cuales me enseñaron que no todo es felicidad, sí no también dolor, el cual me enseñaron a soportarlo, a mi madre Julia Castro Castillo por ser un ejemplo de coraje y fortaleza, por ser más que mi madre, ser una consejera y una amiga, por ponerme siempre los pies sobre la tierra, por ser un apoyo incondicional, un ejemplo de humildad y de calidez humana y por alentarme a salir adelante siempre, a mi padre A. René Bonfil Blas, por ser mi amigo, mi confidente, por enseñarme a ser un hombre de trabajo, responsable y enseñarme que en la vida la cosas que en verdad valen la pena no son fáciles, por enseñarme a no rendirme

nunca, por ser un apoyo incondicional y enseñarme a ser un hombre de bien, a mi hermana Alitzel Gpe. Bonfil Castro, por alentarme siempre con sus palabras y motivarme para ser un buen ejemplo para ella, por estar a mi lado en los momentos más vulnerables y por el hecho de ser mi hermanita, a mi hermano y compadre René Bonfil Castro, por estar conmigo en el gusto momento en el cual más necesita una palabra de aliento, por ser mi hermano mayor, por protegerme y regañarme cuando era necesario, por todos tus consejos, por todas las cosas que hemos vivido juntos, no sabes cuan agradecido estoy contigo, a todos y cada uno de ustedes los quiero infinitamente y les agradezco por haber compartido esta etapa conmigo y por todo lo que está por venir, muchas gracias.

A mi familia, a mi primo, Abraham por motivarme a salir adelante y demostrar de lo que somos capaces y que “No solo de carne vive el hombre” jajaja, a todos mis primos, primas, sobrinos, sobrinas, tíos, tías y todos los que estuvieron a mi lado alentándome siempre a mejorar cada día, a mis abuelitos que más que abuelos fueron y siempre serán mis segundos padres, a mi mami Fina que sé que me está viendo desde algún lugar, aquí está su “Doc”, a mi papi Julián de su valedor “Talatín Catrín”, solo me resta decirles gracias y que los quiero.

A mis amigos, es difícil agradecerles a todos y todas, a veces es mejor no poner nombres para evitar omisiones, pero en este caso lo amerita y sí alguno se me llegara a olvidar (que es lo más seguro), espero y entienda que también formo parte importante en esto, en primera agradecerle a mi “Partner” Raziél, por realizar este trabajo conmigo, por todo lo vivido, por apoyarnos mutuamente y por ser más que mi amigo y ser como hermanos, a mis amigos, Cesar (Barush), Cesar (Chijaro), Jorge, Pau, Pao, Yadi, Erick (Flaco), Jorgito, Peter, Edmundo (Monkey), Gaby, Rocio (Rose Mary), Karina, Yesenia, José (Cuervo), el culpable de que este hoy aquí, gracias, a todos y todas aquellos que trabajaron y estudiaron conmigo, les agradezco infinitamente su amistad y su apoyo, a todos aquellos que no me viene su nombre a mi mente en este momento, solo me resta agradecerles a todos y cada uno de ustedes.

A mi novia Saby, por estar conmigo en momentos de vulnerabilidad, por ser un apoyo incondicional, por motivarme a no desistir de mis ideales, por ayudarme a mejorar como persona y por tantas cosas más gracias, pero sobre todo por todo el cariño que me has dado sin esperar nada a cambio, por todo el amor y detalles que tienes hacia mi persona, eres una personita súper importante para mí, solo me resta decirte gracias.

A mis maestros, a mí querida Mtra. Maricela Arteaga, por todas sus enseñanzas, por todo el conocimiento transmitido, pero sobre todo por ser más que una maestra, por ser una confidente, una consejera y por toda su calidez humana, por todo lo que nos enseñó que no se aprende en las escuelas, por esto y por muchas cosas más gracias.

A mi director de Tesis, M. en C. Eliseo Cantellano, por todo lo que nos enseñó, por ser más que un profesor, por ser un amigo, por todo el conocimiento aprendido y por el tiempo dedicado a este trabajo, muchas gracias.

A mis revisores de tesis, a la Mtra. Ma. De los Angeles Galvan, Mtro. Manuel F. Rico Bernal y al Mtro. Jorge A. Valdivia, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y sus observaciones que enriquecieron este trabajo, gracias.

Finalmente solo me resta agradecerles al Sr. Francisco y a toda su familia, por todas las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

Bien me dijo alguna vez mi padre “Sí las cosas que valen la pena fueran fáciles cualquiera las haría” por eso esfuérate.

“Por mi raza hablara el espíritu”

JOSÉ RAZIEL VALENCIA LIRA

En esta parte de la tesis tal vez me vuelva injusto porque por descuido olvide, o por no tener mención en este registro escrito, de las muchas personas que contribuyeron a que este trabajo salga a la luz. Esta tesis no es solo su escritura, sino la investigación, la gestión del proyecto, el desarrollo de la idea y puesta en acción, así como la culminación de más de 18 años de estudios ininterrumpidos. Enumerar a las personas que me ayudaron en esto sería interminable, ya que por suerte cuento con mucha gente que me ayuda, me ayudó y me seguirá ayudando en mi vida académica, personal y mi recién iniciada vida laboral.

Agradezco a la Biol. Maricela Arteaga Mejía por haber confiado en mi persona, por la paciencia, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, esenciales para la elaboración de este trabajo. Al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, por su dirección, paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplio conocimiento sobre los procesos estudiados en esta tesis. Su colaboración fue de gran ayuda durante mis ausencias por diversas razones. Le agradezco también por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes dudas surgidas durante el desarrollo de este trabajo, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos.

A la Biol. Ma. De los Ángeles Galván Villanueva por su paciencia ante mi inconsistencia, su comprensión, y especialmente por aquellas palabras de bienvenida el primer día que pisé la facultad. Al M. en C. Jorge Antonio Valdivia Anistro quien fue un maestro siempre generoso y dispuesto como pocos, que compartió conocimientos y experiencias de que fueron de gran valor, además de brindarme sus conocimientos e inspiración profesional desde los primeros momentos de la carrera y, por último pero no menos importante, al M. en C. Manuel Faustino Rico Bernal por sus comentarios en el proceso de elaboración de la tesis y sus atinadas correcciones.

A mi compañero y amigo, Neftalí Bonfil Castro, por toda la ayuda que tan espléndidamente me ha brindado a lo largo del último año de este trabajo, por compartir conmigo su amistad, su disponibilidad constante en el plano académico, su apoyo incondicional, y su paciencia, sin los cuales, jamás hubiera podido presentar esta tesis.

No puedo dejar atrás a mis colegas y amigos de la FESZ, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos 4 años de convivir dentro y fuera del salón de clase, a todos ustedes, gracias.

A mi mamá, Laura, por haberme educado, apoyado y amado como nadie más lo ha hecho a lo largo de toda mi vida, por eso y desde lo más profundo de mí ser, gracias. A mi papá, Raciél, que nunca dejó que mirara hacia atrás. A mi hermano Carlos, que siempre me apoyo incondicionalmente. A mi tía Esperanza por estar siempre al pendiente de mí. A mis abuelos Lira a mi tía Rosalía, por guiarme sobre el camino de la ciencia. (Creo ahora entender porque me obligabas a estudiar y a terminar mi tarea antes de hacer cualquier cosa).

A mis familias Valencia, Lira Carmona, Miranda, y Saúl porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, que fue lo que me hizo ir hasta el final.

A todos mis amigos y amigas de la Prepa de Churubusco, que me hicieron mucho más manejables estos 4 años, y a todas aquellas personas que han sido importantes para mí durante todo este tiempo. A todos mis maestros que aportaron a mi formación. Para quienes me enseñaron más que el saber científico, a quienes me enseñaron a ser lo que no se aprende en salón de clase y a compartir el conocimiento con los demás.

Por último, y no menos importante, y a aquellas personas de Apaxtla de Castrejón, Guerrero, que colaboraron y fueron parte elemental de este trabajo. Pancho, Felipe, el señor Álvaro y su familia, a aquellos que se quedaron en el camino. A ellos mi respeto y agradecimiento eterno.

Por último quiero decir que esto va por todos ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí. A mi familia, amigos y hermanos de vida. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Ganar no solo es un pensamiento, es lo único en lo que hay que pensar. Uno no gana de vez en cuando; no hace las cosas correctas de vez en cuando; uno las tiene que hacer bien constantemente. Y esto crea un hábito que lo llevará la victoria.

Vince Lombardi

Gracias a todos.

Octubre 2011

1. Resumen

El proyecto se desarrolló en Apaxtla de Castrejón, se ubica en la región norte del Estado de Guerrero durante el año se presenta una escases significativa de agua para diferentes usos, principalmente en la época de estiaje. Una de sus principales actividades es la crianza de ganado porcino. Además del elevado consumo de agua, esta actividad genera descargas residuales con alta cantidad de contaminantes, principalmente materia orgánica, nitrógeno y bacterias coliformes. Como una respuesta para atender el problema, el presente proyecto tuvo por objetivos diseñar, construir y establecer un sistema de biodigestores tubulares para el tratamiento de aguas residuales generadas en una granja porcícola la cual albergaba a 250 cabezas de diferentes tallas, a partir de su caracterización física, química y biológica; así mismo, las actividades de limpieza de las corraletas generan 1800 litros de aguas residuales por día. Se determinaron los requerimientos de inversión para su establecimiento, se promovió la participación y capacitación de los productores en la implementación del proyecto.

Los resultados obtenidos indican una remoción del 96% para DBO_5 , 68% para DQO, 87% de materia orgánica, 90% de nitrógeno, 95% de bacterias coliformes, 70% de remoción de grasas y aceites, así como bajos porcentajes de remoción de fósforo con 20%. Además se desarrolló una guía de diseño para el establecimiento y mantenimiento de los biodigestores, con el objetivo de promover su mayor conocimiento técnico y práctico en grupos de productores.

Los biodigestores representan una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales derivadas de la porcicultura, debido a su bajo costo, fácil operación y mantenimiento, demostrándose su factibilidad por medio del presente trabajo.

2. Introducción

El incremento de la población hará que la disponibilidad media per cápita de agua a nivel nacional disminuya de 4288 m³ /hab/año en el año 2008 a 3793 m³ /hab/año en el 2030. Para ese año en algunas de las regiones hidrológico-administrativas del país, la disponibilidad natural media de agua alcanzará niveles cercanos o inferiores a los 1000 m³ /hab/año, una condición calificada como de escasez grave. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la generación de aguas residuales municipales y no municipales es de 13.45 Km³/año (254.8 m³/s), de las cuales se recolectan a través del sistema de alcantarillado 6.56 Km³/año (208 m³/s), generando 9.01x10⁶ ton de DBO₅ al año, siendo los usos no municipales lo que generan una mayor DBO₅, con 7x10⁶ ton, de las cuales sólo se remueven en los sistemas de tratamiento 1.73x10⁶ ton.

Las descargas generadas por las actividades pecuarias, se caracterizan por la presencia de abundante materia orgánica y nitrógeno, principalmente; de acuerdo con la CONAGUA, el sector pecuario, genera 18,336,688 m³/año, lo que lo ubica en la cuarta posición de acuerdo al volumen de descarga generado, solo superado por el sector industrial, de acuacultura y las descargas del sector público (CONAGUA, 2009).

La porcicultura se ubica en el lugar 18 en el ámbito mundial, en segundo lugar en Latinoamérica y ocupa el tercer puesto entre las actividades pecuarias del país, el 60% corresponde a productores en pequeña escala. Se considera que aproximadamente el 38% de las granjas descargan sus residuos en cuerpos receptores propiedad de la nación, sin ningún tratamiento lo que provoca un alto grado de contaminación. (SAGARPA, 2007).

En Apaxtla de Castrejón Gro, se ubica una granja porcícola que alberga a 250 cabezas de diferentes tallas, cuando estos alcanzan la talla comercial se

distribuyen en la región. Las actividades de limpieza de las corraletas generan 1800 litros de aguas residuales por día y se descargan a una poza rústica, posteriormente a través de la escorrentía llegan a una barranca que desemboca en el río Oxtotitlán y finalmente se incorpora al Balsas. Además, en la zona de estudio el nivel freático en algunas zonas se ubica aproximadamente a 5 m de profundidad, lo que representa un riesgo ambiental para la calidad del agua subterránea, si continúa la descarga de aguas residuales sin tratamiento; como una respuesta para atender el problema se propone el diseño, construcción y establecimiento de biodigestores para el tratamiento de las aguas residuales derivadas de esta actividad.

Los biodigestores tubulares de polietileno ofrecen una alternativa viable, de bajo costo, fácil operación y mantenimiento, como una fase del tratamiento de las descargas derivadas de la porcicultura, además ofrece la oportunidad de remover una alta cantidad de materia orgánica, así como la producción de biogás y bioabono.

3. Marco Teórico

3.1 Contexto general del agua en México

Se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el territorio nacional, las cuales que se han agrupado o subdividido en 728 cuencas hidrológicas, así como 37 regiones hidrológicas, éstas a su vez en 13 regiones hidrológico-administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, respetando los límites municipales para facilitar la integración de la información socioeconómica. El país cuenta con 653 acuíferos, la medición del ciclo hidrológico lo lleva a cabo CONAGUA con 4,080 estaciones hidrométricas y climatológicas. (CONAGUA, 2009).

México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros, donde destacan 50 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional. El agua subterránea proporciona el 37% del volumen total concesionado para usos consuntivos, se consideran como sobreexplotados 101 acuíferos. En México llueve un promedio de 1,489 km³ al año, de los cuales se evapotranspira el 73.2%, el 22.1% escurre por ríos y arroyos, el 4.7% restante se infiltra al subsuelo de forma natural. (CONAGUA, 2009).

Existe un grado de presión sobre el recurso el cual se calcula como el porcentaje de agua para uso consuntivo respecto a la disponibilidad total. Si es mayor a 40%, se considera que se ejerce una fuerte presión sobre el recurso. A nivel nacional, el valor es de 17% o moderado. Regionalmente, las zonas centro, norte y noroeste del país tienen fuerte presión sobre el recurso. (CONAGUA, 2009).

Con respecto a la calidad del agua, en 2008 se tuvieron 1,186 sitios de monitoreo de la calidad del agua operados por CONAGUA, considerándose principalmente tres indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), Demanda

Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los resultados para 2008 mostraban que tenían una calificación de excelente el 40.6% de los sitios para DBO_5 , el 23.3% para DQO y el 42.3% para SST. Para el resto de los sitios su calificación variaba de buena calidad a fuertemente contaminada. Los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios se agrupan para fines prácticos en usos consuntivos (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas) y no consuntivos (hidroeléctricas). El 63% del agua para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), el resto de aguas subterráneas. Por otro lado, la industria se abastece directamente de ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país, los principales rubros son la industria química, azucarera, petrolera, celulosa y de papel (CONAGUA, 2009).

En México se tienen más de 4,462 presas y bordos de almacenamiento, 6.50 millones de hectáreas de riego, 2.74 millones de hectáreas de temporal tecnificado, 604 plantas potabilizadoras en operación, 1,833 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, 2,082 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación y más de 3,000 km de acueductos. Al 2005 se estimaba que el 89.2% de la población nacional tenía cobertura de agua potable, para 2008 fue de 90.3%. La cobertura de alcantarillado incluye a las personas que tienen conexión a la red de alcantarillado, a fosa séptica, a desagüe, barranca, grieta, lago o mar. Al 2005, el 85.6% de la población nacional tenía cobertura de alcantarillado y de 86.4% en 2008 (CONAGUA, 2009).

Problemática de las aguas residuales en México

En infraestructura para el tratamiento y reúso del agua residual, las descargas se clasifican por su origen, en municipales, manejadas por los sistemas de alcantarillado municipal, urbano, rural e industrial, directas a cuerpos receptores de agua propiedad de la nación. Las 1,833 plantas de tratamiento de aguas

residuales municipales en operación, en 2008 trataron el 40% de los 208 m³/s de aguas residuales recolectados. Se estima que la industria trató 33.7 m³/s en las 2,082 plantas en operación a nivel nacional durante el mismo año. Se reutilizaron 5,051 millones de m³, destacando la transferencia de aguas residuales colectadas hacia cultivos agrícolas, en menor proporción, se reutilizan las aguas en la industria (CONAGUA, 2009). (Tabla 1)

Tabla 1. Generación, colecta, tratamiento y rehúso de las aguas residuales en centros urbanos y usos no municipales

Centros urbanos (descargas municipales)

Aguas residuales	7.44	Km ³ / año (235.8 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.56	Km ³ / año (208 m ³ /s)
Se tratan	2.64	Km ³ / año (83.64 m ³ /s)
Generan	2.01	Millones de toneladas DBO ₅ / año
Se recolectan en alcantarillado	1.77	Millones de toneladas DBO ₅ / año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.58	Millones de toneladas DBO ₅ / año

Usos no municipales, incluyendo a la industria:

Aguas residuales	6.01	Km ³ / año (190.4 m ³ /s)
Se tratan	1.07	Km ³ / año (33.7 m ³ /s)
Generan	7	Millones de toneladas DBO ₅ / año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.15	Millones de toneladas DBO ₅ / año

Fuente: CONAGUA. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2009

En México, como en muchos países del mundo, las principales fuentes de contaminación del agua se clasifican en tres grupos, de acuerdo con su origen:

Municipales. Se considera que el 60% de la población mexicana está concentrada en las grandes ciudades, las cuales son las principales generadoras de este tipo de descargas, correspondiendo a las descargas de residuos de origen doméstico y público, donde se calcula que el 57% de las aguas residuales son

generadas en estos núcleos poblacionales, donde una de las principales generadoras, se encuentran en zonas localizadas en torno a las ciudades de México (23%), Monterrey (4.1%) y Guadalajara (4%) (CONAGUA, 2003).

Industriales. Integrado por las descargas generadas de las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usados como bienes de consumo y satisfactores para la población, se calcula que la industria genera el 43% de las aguas residuales (CONAGUA, 2003).

Pecuarías. Se encuentra constituido por los efluentes de las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor así como por las aguas de retorno de los campos agrícolas. Se calcula que la superficie agrícola de riego y de temporal es de 28 millones de hectáreas, que se irrigan con 92,500 millones de m³ de agua consumiendo el 82% de ella, por lo que su aportación a la generación de aguas residuales es del 12% (11,100 millones de m³) del total de las aguas residuales generadas por los diferentes rubros. Las aguas de retorno agrícola son una fuente de contaminación importante cuyo impacto se manifiesta en el alto porcentaje de cuerpos de agua que se encuentran en condiciones de eutrofización (Arteaga, 2010).

Con relación a la actividad pecuaria, México genera una demanda de 189,083,627 m³/año, de los cuales son extraídos 64,750,312 m³/año de cuerpos superficiales y 124,333,315 m³/año de aguas subterráneas, provocando un alto grado de presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2009).

3.2 Porcicultura y aguas residuales

La porcicultura como principal actividad ganadera a nivel mundial, tiene un impacto negativo en la calidad del aire, agua y suelo. De estos efectos, la contaminación del agua es el más preocupante, pues es un recurso limitado en

muchas regiones del mundo, las granjas de cerdos generan grandes cantidades de líquidos mezclados con excremento que contamina los abastecimientos de agua, principalmente por materia orgánica y nitrógeno (ACP, *et al.*, 1997).

- **Contaminación del aire.** Las emisiones de amoníaco, sulfuros de hidrógeno, entre otras sustancias derivadas de la digestión de la materia orgánica, producen molestias por los olores desagradables, siendo además precursores de trastornos respiratorios en el hombre y animales, entre otros problemas como es la contribución de la destrucción de la capa de ozono, por la producción de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) como parte de los gases emitidos durante la degradación microbiana (Pacheco, *et al.*, 1997).

- **Contaminación del suelo.** El vertido de un volumen de estiércol excesivo puede ocasionar la acumulación de nutrientes en el suelo y producir su alteración en pH, la infiltración al subsuelo de nutrimentos tales como el nitrógeno y el fosforo en altas concentraciones, contaminación microbiológica, entre otros. Otro problema relacionado es la acumulación de metales pesados en la capa superficial del suelo, particularmente por la presencia de sales de hierro y cobre (Kato, 1995).

- **Contaminación del agua.** La contaminación del agua superficial por las excretas se manifiesta por la presencia de amonio, sulfatos, materia orgánica, organismos coliformes, entre otros. El exceso de nutrientes favorece el crecimiento de las algas desencadenando el agotamiento del O_2 disuelto, favoreciendo la proliferación de larvas de insectos nocivos y en casos severos se provoca la eutrofización de los cuerpos de agua donde son vertidos, por su parte el amonio es tóxico para los peces y los invertebrados acuáticos (Pacheco *et al.*, 1997). De igual forma, se produce la contaminación de mantos acuíferos por la actividad porcícola, debido a la presencia de sólidos suspendidos, coliformes y nitrógeno entre otros, sobre todo en suelo permeable (Méndez, 2009).

Está actividad genera 4.5 toneladas de DBO₅ y 10.4 toneladas de Sólidos Suspendidos Totales (SST), además de otros elementos también contaminantes como el nitrógeno, el fósforo, coliformes y trazas de metales. (Tabla 2).

Tabla 2. Contaminación producida en explotaciones porcinas

Parámetro	Por 100 kg de peso vivo	100 cerdos en ceba/día	Por año
Demanda Bioquímica de Oxígeno (Kg.)	0.25	12.5	4,562
Demanda Química de Oxígeno (Kg.)	0.75	37.5	13,687
Sólidos Suspendidos Totales (Kg.)	0.6	30	10,950
Sólidos Totales (Kg.)	0.75	2.25	13,687
Nitrógeno (Kg.)	0.045	1.5	547.5

Fuente: Adaptado de ACP, *et al.*, 1997)

En la actualidad la crianza de cerdos se ha convertido en una fuente importante de ingresos en muchas regiones del país. Sin embargo, a la par del beneficio económico y social que representa este tipo de industria, la mayoría de las granjas, especialmente las de pequeña producción, como el estudio de caso que nos ocupa en el presente trabajo, no cuentan con sistemas para el tratamiento de los residuos sólidos y líquidos que generan, situación que en algunos casos se debe a la carencia de capital o del área requerida para los sistemas de tratamiento y en otros, al desconocimiento de la normatividad mexicana que regula los aspectos ambientales de este sector (Victorica, 2005).

Los residuos más importantes por su producción, distribución geográfica y potencial contaminante proceden del ganado porcino, esto en función del número de cabezas que se opere. Esto acrecienta el problema de la contaminación, sin embargo significa una fuente de materia orgánica de alto valor energético,

haciendo posible su posterior aprovechamiento como puede ser la transformación en metano. (Tabla 3).

Tabla 3. Recursos presentes en los desechos porcinos de una explotación de levante y ceba

Producto	Tasa de producción	Producción n d/100 cerdos	Producción a/100 cerdos	Equivalente
Biogás (m ³)	0.69 – 1.02 m ³ /Kg de MS ¹	25.9-38.2	9,400 a 13,900	990 a 1,460 gal de diesel
Nitrógeno (Kg)	0.045 Kg/100 Kg de peso	2.25	821	1784 Kg de urea
P ₂ O ₅ (Kg)	0.031 Kg/100 Kg de peso	1.5	547	1,190 Kg de super-fosfato triple

¹ Producción de materia seca: 0.75 Kg por 100 kpv.

Fuente: ACP, *et al.*, 1997

Porcicultura en México

Una de las principales actividades pecuarias del país es la cría, engorda y sacrificio de ganado porcino, que es considerada como una de las principales fuentes de proteína en la dieta de los mexicanos y en especial en las zonas de bajos recursos económicos, debido a que su costo es menor que otras carnes rojas. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) hasta el año 2007 México contaba con una producción de 9,021,192 cabezas de ganado entre las que se encuentran ganado fino, corriente y de cruce, siendo el más abundante el fino, con 4,288,404 cabezas, seguido por los animales de cruce con 2,435,360 (INEGI, 2007).

La producción porcina se desarrolla principalmente en los estados de Guanajuato, Michoacán, Jalisco, Sonora y Veracruz. Sin embargo, Guerrero es uno de los estados con mayor demanda y se ubica en la posición 10 de acuerdo con el volumen de producción de carne de cerdo. En este estado se consume mayor cantidad de carne de cerdo debido a la gastronomía de la zona y las condiciones

socioeconómicas del estado, cuenta con una producción de 369,745 cabezas/año, de las cuales solo una pequeña proporción son producidas en granjas, las cuales cuentan con diversos grados de tecnificación, de esta manera se producen 70,508 cabezas de ganado y el resto en unidades de crianza domésticas, específicamente en el municipio de Apaxtla se cuenta con una producción de 1740 cabezas de ganado, de las cuales 215 son corrientes y el resto de cruza o finos (INEGI, 2007).

Del total de cabezas de ganado presentes en el municipio, el 7% se encuentra en la granja donde se llevó a cabo el presente trabajo, en este sitio se descargaba el agua residual sin ningún tratamiento a una poza rústica y posteriormente por medio de una esorrentía se vertía al río Oxtotitlan, debido a esta situación y al malestar de campesinos usuarios del agua del río, fue necesario implementar medidas para mitigar la contaminación del sitio y zonas aledañas derivada de esta actividad.

Para evitar sanciones fue necesario ubicarse dentro del marco jurídico, respaldado por normas y leyes que surgen de la Constitución Mexicana que contempla artículos relacionados con el derecho a la salud, al dominio de los recursos naturales, entre otros. A partir de estos, para evitar sanciones se deben acatar los lineamientos y requisitos, ya que estas actividades generan un impacto negativo al ambiente y a la salud pública.

Dentro de las leyes relacionadas con la regulación de la actividad porcícola son:

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
- Ley de Aguas Nacionales
- Ley Federal de Derechos en Materia de Agua
- Ley General de Salud

El cumplimiento de las leyes se realiza a través de normas y regulaciones que por lo general son promulgadas por la dependencia de gobierno que se encarga de su aplicación. Las regulaciones y normas ambientales están dirigidas solo al recurso que se pretende proteger. Al respecto, el 6 de Enero de 1997 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM 001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a aguas y bienes de la nación (Méndez, *et.al.*, 2009).

Residuos

En el caso de la porcicultura, cada cerdo requiere de 0.12 a 0.22 L de agua, por kilogramo de peso vivo, lo que representa en una unidad de 100 hembras, un gasto entre 7,500 y 10,000 L de agua diarios, equivalentes a 225,000 L de agua al mes, así como 6.36 toneladas de alimento para la obtención de una tonelada de cerdo en canal, este es uno de los problemas más fuertes debido a la gran cantidad de alimento que necesitan consumir este tipo de animales para la producción de carne dada su condición fisiológica, generando una gran cantidad de residuos derivados de la materia fecal y alimento desperdiciado, el cual posteriormente al ser mezclado durante la limpieza de las unidades de crianza y engorda, generan una descarga con una alta carga orgánica (Bravo, *et al.*, 2008) (Tabla 4).

Tabla 4. Producción de heces y orina en cerdos por cada 100 Kg de peso vivo

Estado fisiológico	Rango(Kg)	Promedio(Kg)
Hembra vacía	3.3-6.4	4.61
Hembra gestante	6.0-8.9	3.0
Hembra lactante	6.0-8.9	7.72
Macho reproductor	2.0-3.3	2.81

Lechón lactante	6.8-10.9	8.02
Levante	5.9-6.6	6.26
Finalización	5.7-6.5	6.26

Fuente: ACP, *et al.*, 1997

Lo anterior origina que la carga orgánica en el agua residual de una granja porcina sea mayor que la de residuos municipales, con una cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) de 23,013 mg L⁻¹ y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 7,238 mg L⁻¹, parámetros que se encuentran muy por arriba de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (150 - 200 mg L⁻¹), NOM-002-SEMARNAT-1996 (150 - 200 mg L⁻¹) y NOM-003-SEMARNAT-1996 (20 - 30 mg L⁻¹). De ahí la necesidad de implementar sistemas de tratamiento. El grado en que esta contaminación afecta a las fuentes de agua depende de la cantidad de agua residual generada, de la separación de sólidos que se realice y del manejo dado a las aguas residuales, de los cuales tanto el efluente líquido como la fracción sólida de las excretas, contienen gran cantidad de microorganismos patógenos, mismos que pueden sobrevivir por largos periodos de almacenamiento (Taiganides, *et al.*, 1996).

Entre las bacterias que se pueden encontrar en los efluentes líquidos de este tipo están *Salmonella spp*, *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus anthracis*, *Brucella spp.*, *Leptospira spp.* *Brachyspirahyo dysenteriae*, *Erysipelothrix rhusiopathiae* y *Clostridium perfringens*; parásitos como *Cryptosporidium parvum*; y virus semejantes a los enterovirus (Bravo, *et al.*, 2008).

3.3 Tratamiento de aguas residuales en México

Existen una gran variedad de tecnologías para el tratamiento de las descargas de las aguas residuales derivadas de diferentes giros, muchas de ellas cuentan con algunas ventajas y desventajas. Desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, determinados procesos de tratamiento tienen muy bajos consumos

energéticos (procesos anaerobios, facultativos y aerobios sin aireación), frente a otros más intensivos en energía (la mayor parte de procesos aerobios). Este consumo de energía suele ir ligado a emisiones adicionales de dióxido de carbono y otros contaminantes en la generación eléctrica (Escalas, 2006).

Los procesos aerobios convierten parte de la materia orgánica a dióxido de carbono (gas invernadero), mientras los anaerobios. La combustión del biogás, ya sea para recuperación energética o para la conversión del metano a dióxido de carbono, puede generar emisiones contaminantes (Escalas, 2006).

Estos aspectos sólo pueden estudiarse rigurosamente mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) aplicado a las tecnologías de tratamiento de aguas residuales. En todo el mundo y en México en particular, este enfoque no ha sido hasta ahora el predominante en la selección de las tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales municipales. En general, los criterios han sido:

- a) La viabilidad económica y técnica de la construcción y operación de la planta.
- b) La calidad de efluente que es posible obtener con cada tecnología (frente a la calidad exigida en la descarga o reutilización del agua).
- c) La confianza que las tecnologías ofrecen a las autoridades, por haber sido probadas o no en un número suficiente de instalaciones en el mundo. (Escalas, 2006.).

En las zonas urbanas del país se han aplicado generalmente procesos mecanizados, como los procesos de tratamiento con costos energéticos altos así como elevados costos de mantenimiento, dentro de este tipo de procesos se encuentran los tratamientos con lodos activados, discontinuos (RBS), activados

de flujo continuo y lagunas aireadas. Sin embargo, en algunas ciudades medias y sobre todo en poblaciones rurales de zonas con nivel de marginación alto o medio, se ha recurrido mayoritariamente a sistemas de bajo costos de inversión, operación y de bajo consumo energético (Sánchez, 2006). Ello con el fin de dar una respuesta a la falta de recursos económicos y personal capacitado para operar plantas más caras y complejas. Los sistemas proyectados o en construcción son en su mayoría diferentes combinaciones de lagunas de estabilización, reactores anaerobios, filtros de rocas y humedales artificiales (IDAE, 2008).

A continuación se comentan los principales procesos de tratamiento empleados en México, el número de plantas instaladas, así como su capacidad de tratamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Procesos de tratamiento empleados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de México

Proceso	N° de plantas	Caudal L/s	% Caudal
Dual	3	3,300	3.7
Lagunas de estabilización	549	16,050	18.1
Primario	13	3,145	3.5
Tanque Imhoff	58	659	0.7
Tanque séptico	67	305	0.3
Wetland	64	330	0.4
Filtro biológico	46	4,318	4.9
RAFA	65	1,476	1.7
Biodiscos	7	734	0.8
Lagunas aireadas	15	5,932	6.7
Zanjas de oxidación	28	2,612	2.9
Primario avanzado	16	11,235	12.7
Lodos activados	280	38,120	43.0
Reactor enzimático	41	102	0.1

Otros	48	401	0.5
Total	1300	88,718	100

Fuente: CNA, 2005

Proceso de lodos activados

Es un proceso aerobio mecanizado, construido en plantas de concreto, tiene en general elevados costos de inversión y operación, produciendo efluentes de mayor calidad que otros procesos simples, como el anaerobio o las lagunas. Para el proceso de lodos activados de flujo continuo, los costos de inversión en México, estimados por Escalas (2006), a partir de plantas reales, son de 18,000–36,000 USD/L/s, en función del gasto de diseño de la planta, mientras los costos de operación son de 0,07-0,22 USD/m³. En plantas muy grandes con digestión anaerobia de lodos y generación de biogás, los costos de operación pueden ser menores. La calidad del efluente del proceso de lodos activados es elevada, aunque puede requerir algo más que desinfección (coagulación, sedimentación o filtración terciarias) para uso público urbano. El proceso discontinuo de lodos activados utilizado en los reactores biológicos secuenciales (RBS) produce un efluente en general de mejor calidad y permite una gran flexibilidad de operación, además de requerir menos espacio en planta para su construcción (Escalas, 2006).

El proceso de lodos activados se ha empleado frecuentemente en México para el tratamiento de medianos y grandes caudales en zonas urbanas o periurbanas con terreno escaso y/o caro, especialmente en aplicaciones de reutilización del agua en uso público urbano, ya que proporciona una calidad adecuada. Por otro lado al ser un proceso largamente probado en muchos países y venir respaldado por fuertes compañías del sector, ha sido la tecnología seleccionada. En diciembre de 2004, 22% de las 1,300 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales en operación en México eran de procesos de lodos activados que,

sumando el 43% del caudal instalado en las plantas en operación, con un promedio de 136 L/s por planta, según datos elaborados a partir de la CNA (2005).

El proceso de lodos activados, se considera entonces como un proceso apto en México para cumplir con los límites más estrictos de las NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, pero con considerables o elevados costos de inversión y operación (Escalas, 2006).

Lagunas de estabilización

La calidad del efluente de las lagunas de estabilización no es en general tan buena como la del proceso de lodos activados, a no ser que se utilicen tiempos de retención muy elevados y, en algunos casos, postratamientos para remover sólidos y patógenos. Sin embargo, las lagunas son adecuadas para cumplir con la mayor parte de los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (riego agrícola directo y descarga a cuerpos de agua destinados al riego agrícola) (Escalas, 2006).

Resisten bien las oscilaciones de carga y caudal, este tipo de sistemas se han aplicado ampliamente en México, especialmente en poblaciones con disponibilidad de terrenos cercanos al núcleo urbano. En diciembre de 2004, 549 PTAR municipales operaban en México basadas en lagunas de estabilización (42% del total), aunque sólo sumaban 18% del caudal instalado de las plantas en operación, con un caudal instalado promedio de 29,2 L/s por planta, según datos elaborados a partir de la CNA, 2005.

Las lagunas aireadas facultativas tienen costos de inversión intermedios entre el proceso de lodos activados y las lagunas de estabilización, suponen una alternativa para considerar cuando existen amplias extensiones de terreno pero su disponibilidad o su precio no hace viable la construcción de lagunas de

estabilización (ocuparan menos terreno y costos de inversión que el proceso de lodos activados). En diciembre de 2004 operaban en México 15 PTAR municipales basadas en lagunas aireadas, que sumaban 6,7% del caudal de instalado en las plantas en operación (CNA, 2005).

Una de las consideraciones más importantes que se deben de tomar en este tipo de sistemas, como una fuente de contaminación potencial puede ser a través del desbordamiento de las mismas, o si el contenido de las lagunas es drenado intencionalmente a las fuentes de agua. También existe la posibilidad de contaminación de los cuerpos de agua subterráneos por una impermeabilización inadecuada de las lagunas o bien, mediante la aplicación excesiva del efluente a las tierras de cultivo y generar una contaminación por percolación hacia los mantos freáticos o bien por translocación de los contaminantes a los cuerpos de agua superficiales cercanos, así como al suelo (Miner, 1999). Los costos de operación de las lagunas de estabilización son en México bajos o muy bajos (en torno a los \$0,03-0,05 USD/m³), a no ser que se requiera bombear el agua residual desde una cierta distancia o desnivel (Escalas, 2006).

Tratamiento Primario Avanzado (TPA)

En este proceso se mejora el rendimiento de la sedimentación primaria, mediante la coagulación y la floculación previas del efluente del pretratamiento. Según Vesilind (2003), los rendimientos de eliminación en el tratamiento primario convencional y en el TPA son los que se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6. Rendimientos de eliminación, en el tratamiento primario convencional y avanzado

Parámetro	Rendimiento en tratamiento primario convencional (%)	Rendimiento en TPA (%)
SST	40-70	60-90
DBO ₅	25-40	25-40
DQO	n.d	30-60
P total	5-10	70-90
Patógenos	50-60	80-90

n.d.: no disponible

Fuente: Vesilind, 2003.

Con límites de descarga elevados, como la mayoría de los establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, se puede cumplir en muchos casos con la normativa común TPA, sin necesidad de un tratamiento biológico, aunque se deberá completar la remoción de patógenos con la ayuda de lagunas de maduración o sistemas de desinfección química (para el límite de patógenos establecido en la NOM). Los costos de inversión de este tipo de plantas son menores que los de una planta con tratamiento primario simple seguido de lodos activados. En cambio, se consumen reactivos para la coagulación y la floculación, generando grandes volúmenes de lodos, al sumarse el lodo primario y el lodo de hidróxido, obtenidos normalmente durante el proceso de coagulación (Escalas, 2006).

Tratamiento anaerobio

Los sistemas anaerobios son procesos fermentativos que liberan productos finales estables y una producción celular muy baja. Van Haandel y Lettinga (1994) argumentan que sólo el 3% de la materia orgánica presente en el agua residual es convertida en masa celular. El 97% remanente es convertido vía catabolismo en CH₄ y CO₂ como productos finales estables. En términos generales, la producción de lodos biológicos en los sistemas de tratamiento anaeróbico es baja, reduciendo

los costos de tratamiento y disposición final, adicionalmente el CH₄ producido es una fuente de energía renovable (Noyola, 1997).

Los procesos anaerobios tienen bajos requerimientos energéticos e inclusive con ciertos desechos orgánicos pueden producir energía por medio del biogás (CH₄ y CO₂). Producen pocos lodos de purga y estabilizan la materia orgánica que mantienen los nutrientes para fertilizar, lo que la transforma en un mejorador de suelos muy valioso en medios rurales, llamado biol (Noyola, 1997).

La digestión anaerobia se considera un proceso de fermentación y mineralización en el que la materia biodegradable es convertida a compuestos orgánicos e inorgánicos, principalmente a metano y a dióxido de carbono (Noyola, 1997). La principal característica de los procesos anaerobios es la degradación de los compuestos orgánicos por parte de las bacterias que no requieren oxígeno y finalmente con sus reacciones producen el gas metano (Veenstra, *et al.*, 1998).

La digestión anaerobia de las descargas de aguas residuales permite reducir el olor de la materia orgánica en descomposición y favorece su digestión. Permite obtener abono, además se pueden obtener beneficios económicos cuando se integra en un proceso de tratamiento y secado que permite obtener un fertilizante sólido, agua reutilizable y en el que la energía necesaria se genere en régimen de cogeneración con biogás (Veenstra, *et al.*, 1998).

Proceso de la digestión anaerobia

La digestión anaeróbica puede considerarse como la forma más sencilla y segura de dar tratamiento a excrementos humanos y animales en zonas rurales (Brown, 1987). Su aplicación a gran escala se ha visto limitada en parte por razones culturales que desaprueban el uso de excrementos humanos en la producción de biogás y los altos costos de instalación de un biodigestor convencional (Fulford, 1993).

Los desechos porcinos son un sustrato complejo para la digestión anaerobia directa ya que el contenido de los sólidos volátiles está compuesto de materiales solubles fáciles de ser digeridos, así como partículas finas, las cuáles son relativamente inaccesible al ataque microbiano (Viñas, 1995).

Actualmente, la mayoría de las granjas porcinas de México utilizan lagunas de estabilización para el tratamiento de sus aguas residuales. Los cerdos en crecimiento solamente utilizan entre el 30 y el 35% del nitrógeno y el fósforo ingeridos, pues eliminan el remanente a través de las excretas, por lo que éstas poseen virtualmente todos los nutrimentos que requieren las plantas para su crecimiento y desarrollo, representando un recurso valioso que puede reemplazar insumos costosos en la producción de forrajes y otro tipo de cultivos (Victorica, 2005).

3.4 Biodigestores

Antecedentes

La aplicación del proceso de biodigestión se inició antes del siglo XX cuando el biogás era quemado para dar iluminación en Inglaterra (Brown, 1987). En la década de los 30, se mantuvo un interés creciente en la aplicación de digestión anaeróbica, especialmente en zonas rurales, donde los productos de la digestión (biogás y biol) pueden convertirse en productos aprovechables por los agricultores. El biogás es una fuente renovable de energía y el efluente o comúnmente llamado biol (material digerido) tiene una alta concentración de nutrimentos, bajo contenido de patógenos y se encuentra prácticamente libre de semillas viables de malezas (Brown, 1987).

La Fundación CIPAV (Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria) ha implementado en Colombia biodigestores plásticos

de flujo continuo para la producción de biogás (Botero y Preston, 1986) y para la descontaminación de aguas servidas de uso agropecuario y doméstico, siendo la última una opción de bajo costo, fácil manejo, operación y adaptable a las condiciones tropicales desde las zonas más bajas hasta las zonas andinas (Chará, *et al.*, 1999).

Biodigestores anaerobios

La fermentación es un proceso de producción de energía menos eficiente que la respiración; como consecuencia de ello, los organismos heterótrofos estrictamente fermentativos se caracterizan por tasas de crecimiento y de producción celular menores que las de los organismos heterótrofos aeróbicos (Metcalf y Eddy 1996). Los procesos microbiológicos involucrados en la digestión anaerobia, hacen posible la transformación de la materia orgánica presente en el agua residual (polímeros orgánicos complejos), a una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico, denominado comúnmente como biogás, así como material digerido con un elevado valor nutrimental, el cual comúnmente es utilizado como mejorador del suelo; con una composición promedio de 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5 (Botero y Preston, 1987), estos procesos se llevan a cabo por medio de reacciones bioquímicas que son realizadas por diversos grupos de bacterias.

El bioabono sólido o líquido no posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida (McCaskey, 1990); o bien, el bioabono sólido puede deshidratarse y almacenarse para usarlo posteriormente en el entendido de que al deshidratarse puede haber pérdidas por volatilización de hasta 60%, sobre todo de nitrógeno (Day, 1987).

Los biodigestores son un sistema que aprovechan residuos orgánicos, procedentes de actividades agropecuarias, principalmente estiércol, para producir

biogás (combustible) y biol (fertilizante natural) mediante el proceso de digestión anaerobia. No necesitan un monitoreo sofisticado ya que no requieren de mecanismos de mezcla interna, ni sistemas de calefacción. Están hechos de materiales locales, por lo general con bolsas de plástico para el tanque principal y tubos de PVC que transportan el biogás, esta tecnología funciona, con adaptación adecuada, en los climas tropicales, continentales y fríos (Martí, 2008).

Los biodigestores de bajo costo se han implementado en países en desarrollo desde la década de los 80. Debido a su diseño simple y construcción con materiales fácilmente disponibles, se considera una tecnología apropiada. El "red mud PVC" una bolsa diseñada en Taiwán fue la semilla para el desarrollo de esta técnica. Un mayor desarrollo se llevó a cabo principalmente por Preston en Etiopía, por Botero en Colombia y por Bui Xuan An en Vietnam (Martí, 2011).

En el altiplano de Bolivia en el 2003, se adaptó el diseño de Botero a los climas fríos (Martí, 2011). Poggio, en Perú, propuso que se agregue al modelo de Bolivia un sencillo sistema de calefacción solar, para aprovechar los biodigestores en climas fríos. La tecnología ha sido promovida en varios países en desarrollo como Colombia, Etiopía, Tanzania, Vietnam, Camboya, China, Costa Rica, Bolivia, Perú, Ecuador, Argentina, Chile (Martí, 2011) y en nuestro caso, México.

Una alternativa para tratar las aguas residuales de granjas porcinas son los biodigestores tubulares; este tipo de sistemas de bajo costo han sido desarrollados y están implementados en países del sureste asiático, pero en América Latina, solo países como Cuba, Colombia y Brasil tienen desarrollada esta tecnología. Estos modelos de biodigestores contruidos a partir de mangas de polietileno tubular, se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como requerir sólo de materiales locales para su construcción. Por ello se consideran una "tecnología apropiada", para el tratamiento de las

aguas residuales derivadas de la porcicultura, removiendo altos porcentajes de materia orgánica, por medio de la degradación anaeróbica así como la producción de fertilizante natural de una buena calidad y biogás.

Existen otros tipos de tecnologías las cuales emplean la degradación anaerobia para la remoción de contaminantes en las descargas de aguas residuales como lo son: El tanque séptico (o fosa séptica) y el tanque Imhoff representan dos formas tradicionales de tratamiento anaerobio descentralizado de los efluentes domésticos, normalmente en lugares donde no existe red de alcantarillado, también se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales (Escalas, 2006).

El reactor anaerobio de lecho de lodos y flujo ascendente (upflow anaerobic sludge blanket reactor, UASB reactor) se ha llamado en México reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). Este reactor permite tratar aguas residuales a temperatura ambiente, para temperaturas del agua residual de 15° C o más. Esto incluye durante todo el año las regiones de clima tropical y subtropical, como el sureste mexicano. Para temperaturas del afluente de 12-15°C, también es factible el tratamiento anaerobio de aguas residuales municipales, aunque se requiere más investigación para optimizar el proceso (TBW, 2001).

Las regiones incluidas en esta última categoría incluyen los países mediterráneos, el centro y norte de México así como el norte de Chile y Argentina. Los costos de inversión y operación para el tratamiento anaerobio son bajos. El sistema UASB+lagunas facultativas tiene costos de inversión de 9,000-18,000 USD L/s, estimados por Schellingkout y Collazos (1999), para una planta de 360 L/s, con unos costos de operación bajos, en torno a los 0.03 USD/m³. A diciembre de 2004, operaban en México 65 RAFA, que representaban 5% de las plantas en operación y solo 1,7% del caudal instalado en plantas en operación (Escalas, 2006).

Asimismo, funcionaban 125 plantas basadas en tanques sépticos o Imhoff, que trataban otro 1% del volumen instalado en las plantas en operación. Sumando al tratamiento anaerobio las lagunas de estabilización, los humedales artificiales (64 plantas, 0,7% del caudal), y las plantas con tratamiento primario resulta que 862 PTAR municipales (66% del total, 30% del caudal) se basan en tecnologías de bajos costos de inversión y operación y de bajo consumo energético (CNA, 2005).

Entre los digestores anaeróbicos se encuentran los de biomasa fija y biomasa suspendida los cuales se dividen a su vez de acuerdo a la tabla 7.

Tabla 7. Tipos de digestores anaeróbicos

Biomasa fija	Biomasa suspendida
Por lotes	UASB
Digestión seca	Filtro anaerobio
RCTA	DSFFR
Flujo pistón	USFRR
Contacto anaerobio	Lecho expandido y fluidizado

Fuente: Tomado y modificado (Romero, 2008)

Los digestores de biomasa fija son los que han permitido el explosivo aumento en el número de unidades anaerobias construidas para el tratamiento de aguas residuales. Los reactores granulares y todos los que emplean sistemas de biomasa fija con excepción de los lechos fluidizados y expandidos algunos autores los consideran como los más avanzados (Romero, 2008).

Sistemas con Biomasa suspendida

Los primeros reactores anaerobios pueden ser considerados las fosas sépticas y lagunas anaerobias. Los sistemas anaerobios se desarrollaron con la introducción del digestor convencional, que se aplica para la estabilización de los desechos; consiste en un tanque cerrado, sin calentamiento, donde la actividad del microorganismo representa un pequeño porcentaje de la totalidad del tanque. El

sistema de digestión anaerobio evolucionó con la incorporación de un agitador mecánico que puede funcionar con biogás producido por este u otro sistema de limpieza implementado en sistema de aguas residuales (Romero, 2008).

Sistemas con Biomasa Fija

Estos reactores fueron desarrollados en la década de los ochenta y poseen ventajas ante sus antecesores, que los hace más eficientes en la limpieza destacando; la disminución de la retención del agua , siendo de 5 a 3 días , lo que implica una reducción en el volumen del reactor, otras ventajas son la adaptación rápida a cambios de alimentación, los cuales varían de acuerdo a la cantidad de contaminantes presentes en las descargas, y por ultimo también es importante la resistencia a productos tóxicos. Los reactores con sistema de biomasa fija varían en diseño, uno de los más importantes es el Reactor de lecho de lodos UASB, maneja un flujo ascendente dentro de un tubo o tanque y se basa en la sedimentación de la biomasa producida dentro del reactor, misma que alimenta a una cama de lodo dispuesta en la parte inferior del reactor (Romero, 2008).

Sistemas avanzados

Los reactores granulares, más todos los que emplean sistemas de biomasa fija con excepción de los lechos fluidizados y expandidos que algunos autores los consideran como sistemas avanzados, Permiten trabajar con aguas muy diluidas (Romero, 2008).

Biodigestores tubulares

Son tres los límites básicos de los biodigestores: la disponibilidad de agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el biodigestor, la cantidad de ganado y la apropiación de la tecnología por parte de los productores, este modelo de biodigestor consiste en aprovechar el polietileno tubular (de color negro en este caso), para disponer de una cámara de varios metros cúbicos

herméticamente aislada. Este hermetismo es esencial para que se produzcan las reacciones biológicas anaerobias (Preston, 1989).

Cuando las bacterias tienen las condiciones adecuadas dentro del digestor comienza el proceso de degradación de la materia orgánica, tomando como sustrato el estiércol generado en la descarga, hasta llegar a la producción de CO_2 , H_2O y CH_4 (Day, 1987).

Debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la cámara hermética, proporciona las condiciones ideales para que las bacterias anaeróbicas comienzan a degradar el estiércol comenzando así el proceso metanogénico, para la obtención y producción de biogás. El producto gaseoso llamado biogás, realmente tiene otros gases en su composición como son el CO_2 (20-40%), N_2 (2-3%) y H_2S (0,5-2%), siendo el CH_4 el más abundante con un 60-80%. (Martí, 2008).

La digestión anaeróbica es llevada a cabo por una serie de microorganismos como las bacterias hidrolíticas-acidogénicas, acetogénicas, homoacetogénicas, metanogénicas hidrogenófilas, metanogénicas acetoclásticas, las cuales son las encargadas de degradar la materia orgánica, los cuales necesitan un tiempo de residencia dentro del biodigestor para que se establezcan y comiencen a llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica, debido a esta situación, implica que las puestas en marcha de los reactores sean, en general, lentas, requiriendo tiempos que pueden ser del orden de meses. En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo.

Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra ser la metanogénesis, para aumentar la velocidad, la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una

elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el sistema.

Con esto se pueden conseguir sistemas con tiempo de proceso del orden de días, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. Usualmente, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas).

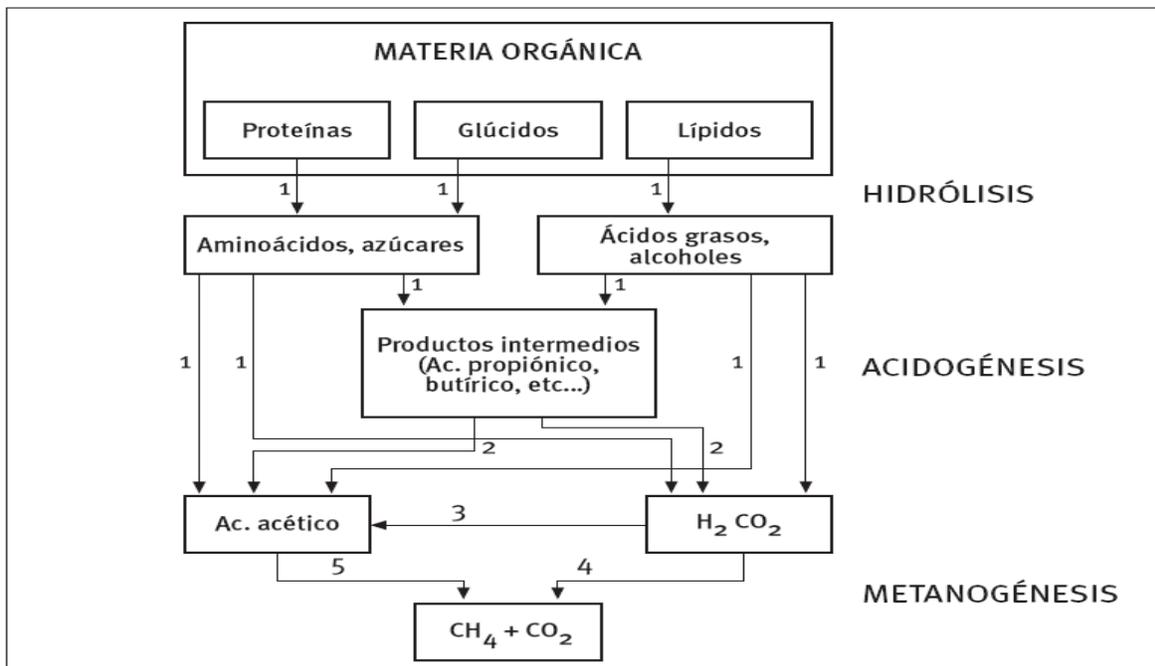


Figura 1. Proceso de degradación de la materia orgánica en ambientes anóxicos. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Fuente: IDAE, 2008

Los parámetros ambientales que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso, son:

- pH, que debe mantenerse cercano a la neutralidad.
- Alcalinidad, para asegurar la capacidad amortiguadora y evitar la acidificación del medio, siendo recomendable una alcalinidad superior a $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de CaCO_3 .
- Potencial redox, con valores recomendables inferiores a -350 mV .
- Nutrientes, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- Tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser la mínima posible. (IDAE, 2008)

Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores:

- **Temperatura.** Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperaturas por debajo de los 5°C), mesófilico (temperaturas en torno a los 35°C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55°C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.
- **Agitación.** En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de substrato a cada población o agregados de bacterias, así como homogeneizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores.
- **Tiempo de retención.** Es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos.

- **Velocidad de carga orgánica.** Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la OLR (por sus siglas en inglés) implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar (IDAE, 2008).

3.5 La digestión anaerobia

La digestión anaeróbica, se refiere al uso de procesos biológicos en un medio anaeróbico para romper cadenas de moléculas complejas en sustancias más simples (Lettinga y Haandel, 1993). En el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.) y en biol, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Gerardi, 2003).

Está se caracteriza por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del substrato, interviniendo diferentes poblaciones de microorganismos. Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo, ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos).

Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del substrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir

una baja del pH. Para la estabilidad del pH es importante en el equilibrio CO₂-bicarbonato. Para hacer posible algunas reacciones es necesaria la asociación sintrófica entre bacterias acetogénicas y metanogénicas, creando agregados de bacterias de estas diferentes poblaciones (IDAE, 2008).

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. La digestión anaerobia también es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias alimentarias.

Etapas de la digestión anaeróbica

- Hidrólisis de los polímeros complejos
- Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H₂ y CO₂
- Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato, H₂, CO₂
- Metanogénesis a partir de H₂, CO₂, acetato

Los organismos clave en la conversión de compuestos orgánicos complejos a metano son los fermentadores secundarios, especialmente las bacterias oxidantes de ácidos grasos o alcoholes que producen H₂, utilizando estos compuestos como fuente de energía en cultivos mixtos con un consumidor de H₂ a través de una relación sintrófica. La energía libre asociada a las conversiones de los ácidos grasos es positiva, pero si la concentración de H₂ se mantiene muy baja debido al consumo constante por los metanógenos pasa a tener signo negativo lo que determina su factibilidad (Madigan, 2003).

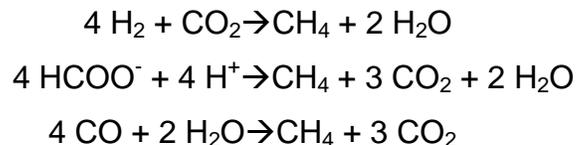
En la mayoría de los ecosistemas anóxicos, la acetogénesis limita el proceso global porque la velocidad de crecimiento de los microorganismos intervinientes es generalmente muy lenta.

La magnitud de la producción de metano por las arqueobacterias es superior a la obtenida anualmente de los pozos de gas natural, las principales fuentes son los eructos de los rumiantes y el gas liberado en las zonas pantanosas, también se lleva a cabo la metanogénesis en el intestino de los vertebrados y de los insectos que comen madera como las termitas (Madigan ,2003).

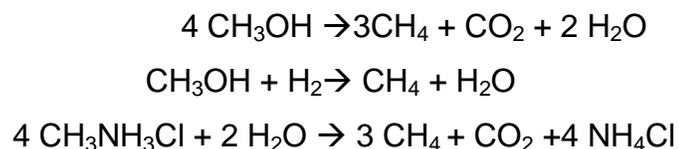
Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina (Madigan,2003).

Los sustratos se dividen en tres clases:

Substratos del tipo CO₂



Sustratos con grupo metilo



Substrato de acetotróficas



Fuente: Schlegel, 1993

La conversión de acetato a metano aparece como un proceso natural muy importante en medios anóxicos de agua dulce y en digestores de residuos, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias. A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis. Por lo tanto, es un proceso que depende de la producción de esos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja (Schlegel, 1993).

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H_2 y el CO_2 que se generan por las actividades de los organismos fermentadores, en el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos de procariontes (Madigan, 2003).

Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre; Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2 . Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato, si éste se halla en alta concentración, además el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos (Schlegel, 1993).

Uno de los parámetros que condiciona la efectividad para remover las cargas orgánicas es la presencia de compuestos fenólicos, ya que inhiben el crecimiento de las bacterias anaerobias metanogénicas.

Arqueobacterias metanogénicas

Durante la degradación de la materia orgánica y la consecuente producción de metano, es necesario la intervención de una serie de microorganismos como se mencionó anteriormente, uno de estos microorganismos son las arqueas metanogénicas, las cuales están implicadas en el proceso de metanogénesis, se clasifican en cuatro órdenes, *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales* (Smith, *et. al.*, 1988).

Cuando los metanógenos crecen de forma autotrófica, el CO_2 es la principal fuente de carbono, sin embargo el crecimiento de casi todos ellos es estimulado por el acetato y en algunas especies por ciertos aminoácidos (Madigan, 2003).

Todos los metanógenos utilizan NH_4^+ como fuente de nitrógeno y algunas especies fijan N_2 (*Methanosarcina*, *Methanococcus*). El níquel es un componente de una coenzima metanogénica y está además presente en las enzimas hidrogenasa y CO-deshidrogenasa. Estos organismos también requieren hierro y cobalto para su crecimiento, tienen algunas coenzimas exclusivas o que intervienen en las reacciones de óxido-reducción como donadores de electrones (Schlegel, 1993).

La reducción del CO_2 por lo general depende del H_2 , pero el formiato, el CO e incluso el Fe^0 sirven como donadores de electrones. El Fe^0 es oxidado a Fe^{++} y los electrones liberados se combinan con los protones para formar H_2 , que es el donador inmediato en la metanogénesis, también los alcoholes pueden aportar electrones en unos pocos casos.

En condiciones normales la variación de energía libre durante la reducción de CO_2 a metano con H_2 manejando rango de -131 kJ/mol a -135 kJ/mol de acuerdo a diversos autores, pero debido a la influencia de la concentración de los reactantes

en los ambientes naturales baja a un intervalo de cerca de -28.5 kJ/mol a -30 kJ/mol. La concentración de H₂ en las zonas metanogénicas no es mayor a 10 mM (Madigan, 2003). (Tabla 8)

Tabla 8. Variación de la energía libre en el proceso de la metanogénesis

Proceso	Reacción	Energía
Metanogénesis	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -135 \text{ kJ}$
	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	$\Delta G = -28.5 \text{ kJ}$

Fuente: Rodríguez, *et al.*, 2009

La etapa terminal de la metanogénesis es la de conservación de la energía, la reducción está asociada con la extrusión de protones a través de la membrana, creando una fuerza motriz de protones, la utilización del gradiente de protones mediante una ATPasa integrada a la membrana, impulsa la síntesis de ATP (Schlegel, 1993).

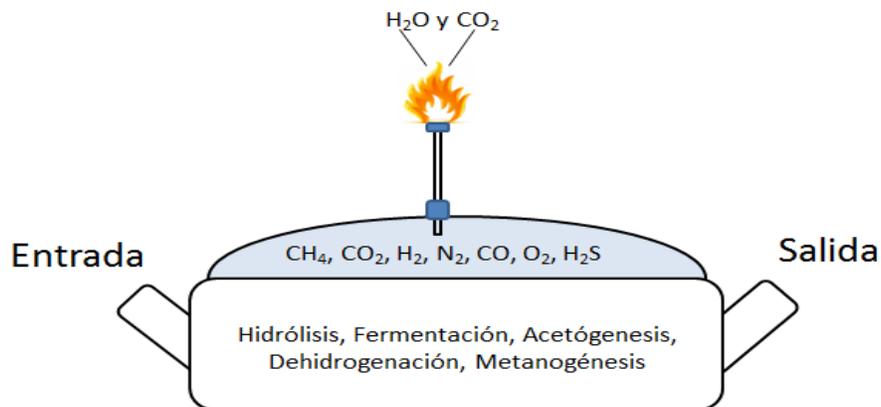


Figura 2. Esquema básico de un biodigestor, así como los procesos de biológicos y subproductos derivados de la digestión anaeróbica

Fuente: Elaboración propia

3.6 Diseño

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. La

temperatura marcará la actividad de las bacterias que digieren el estiércol y cuanto menor temperatura, menor actividad tendrán éstas, por lo tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor, de esta forma la temperatura marca el tiempo de retención.

Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor.

Una cualidad de esta tecnología es que es adaptable a muchas situaciones y su diseño puede considerar diferentes criterios como son:

- Necesidad de combustible
- Necesidades medioambientales (cuando se desea tratar todo el estiércol generado)
- Fertilizante natural
- Límite de estiércol disponible

Según cuál sea el objetivo del biodigestor, proveer de combustible, generar un buen fertilizante o depurar residuos orgánicos; unos parámetros u otros serán los que definan la metodología de cálculo del biodigestor.

Existen varias recomendaciones de diseño de biodigestores. Sin embargo, son muy pocas los trabajos realizados para el tratamiento de desechos de granjas porcícolas a escala real. A partir de la experiencia generada en este proyecto e incorporando la información bibliográfica sobre el tema, se elaborará un manual para el diseño, instalación y mantenimiento de biodigestores que procesen residuos porcícolas.

Si bien es cierto que la industria pecuaria en general causa un alto impacto en el ambiente, no solo las grandes empresas causan contaminación, en su mayoría los productores a pequeña escala son los que un mayor impacto causan en el ambiente, debido a que la gran mayoría de este tipo de productores no cuentan con un sistema de tratamiento y la suma de todas estas pequeñas unidades de producción es mayor a la cantidad de contaminantes descargada por las grandes empresas, los cuales en su mayoría son materia orgánica y nitrógeno (IDAE, 2008).

Debido a la crisis ambiental actual que afecta a la población en general, es necesario implementar proyectos en los cuales se promueva el desarrollo y aprovechamiento sustentable de los recursos y que minimicen el impacto derivado de las actividades productivas generadas por los hábitos de consumo, específicamente derivados de la actividad porcícola. Es necesario involucrar a las comunidades locales para que este tipo de proyectos tengan éxito, lo cual depende del interés de los productores locales por implementar un sistema propio, para el tratamiento de las aguas residuales generadas de la crianza y engorda de cerdos. Para ello, es necesario demostrar la eficiencia y rentabilidad de este tipo de sistemas, a partir de los cuales se puede obtener beneficios adicionales como lo son la producción de bioabono y biogás. De esta manera los productores podrán observar de manera directa un beneficio económico y desearán implementar un sistema propio. Por ello, es necesario que se den todas las condiciones óptimas para que la participación de los productores locales se lleve a cabo.

3.7 Participación social

Las formas de participación y organización son muchas, las más conocidas son la Asamblea, el Consejo de Colaboración, Consejo de Participación Ciudadana, Grupos de Desarrollo, Comisiones de Trabajo, Participantes Activos y Promotor

Comunitario; organizaciones que tienen un papel muy importante en la gran tarea de construir la autogestión comunitaria.

La participación social dentro del proceso de planeación participativa se caracteriza por ser:

- Voluntaria (no se da ningún pago)
- Libre (no está condicionada a recibir recursos o hacer actividades)
- Consciente (sabiendo que implica compromisos)
- Solidaria (por ayudar a otros)
- Universal (todos pueden participar sin distinción de educación, género, edad, posición económica, etc.)
- Por niveles (con opciones de participación según interés y posibilidad de cada persona).

Debido a que se cuenta con una gran variedad de formas de participación ciudadana es necesario plantear una estrategia para que los productores interesados externen su interés por esta tecnología, como podrían ser la obtención de un beneficio económico y evitar problemas ambientales posteriores derivados de sus actividades productivas (granja porcícola). Existen algunos factores necesarios para el funcionamiento de las organizaciones económicas, en este caso los productores de carne de cerdo, tomando en cuenta algunos principios que son determinantes, tanto internos y externos que por sí mismos tienen una alta incidencia en la dinámica de la organización; entre los factores internos tenemos la motivación, como uno de los más importantes ya que es el que genera el interés por desarrollar un proyecto, posteriormente existe la comunicación, la cual permite externar el deseo por contar con un proyecto para desarrollarlo dentro de su sistema de producción, otro factor es la capacitación y asesoría que se le brinda a los productores para que desarrollen de manera óptima el proyecto, la coordinación es otro factor interno en el que interviene la auto gestión de los productores ya que de ello dependerá la capacidad que tengan para organizarse

dentro de su unidad de producción, una de las partes importantes es la dirección del proyecto ya que debe existir un responsable que atienda todas las observaciones y hacer de su conocimiento las necesidades para poder desarrollar de manera óptima este, al final de estos factores internos se encuentra el conocimiento generado, el cual es de vital importancia ya que puede ser la base para desarrollar un proyecto más amplio o considerarlo como un antecedente y llevarlo a cabo en otro lugar donde estén interesados más productores (SGG, 2008).

A su vez existen factores externos que pueden contribuir al desarrollo del proyecto, como son las políticas gubernamentales ya que estas pueden subsidiar el desarrollo de los proyectos con apoyos económicos hacia los productores, la asistencia técnica integral juega un papel preponderante, debido a que el desarrollo del proyecto depende de un grupo de trabajo externo a la comunidad llevando el conocimiento y la tecnología hasta los productores interesados, capacitándolos para que pueden aprovechar de la mejor manera posible la tecnología que se les está proporcionando, la infraestructura y el espacio físico son determinantes en el desarrollo del proyecto, de esto depende la amplitud y el alcance de los objetivos, ya que puede limitar o magnificar a este, el factor ecológico actualmente está ocupando un papel importante en el desarrollo de los proyectos para el uso, manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos, así como el cumplimiento de normas y leyes para evitar sanciones económicas, además de mitigar los efectos de la contaminación ambiental. Finalmente se encuentra el financiamiento el cual por lo general es un factor limitante en el desarrollo de los proyectos, por eso es necesario desarrollar sistemas acordes a la zona de estudio, así como a las necesidades y capacidades de los productores de la zona (SGG, 2008).

El presente trabajo pretende reforzar actividades del accionar en demandas claras y concretas identificadas en poblaciones rurales. Se pretende llegar a la mayor cantidad de personas que estén interesadas en trabajar en materia de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales de origen porcícola y al mismo tiempo crear y despertar en la población rural el interés por la tecnología planteada en búsqueda de una mejor calidad de vida.

4. Zona de Estudio

El municipio de Apaxtla se encuentra al noroeste de la capital del estado de Guerrero, en la llamada región “norte”. Dentro de la coordenadas geográficas 17° 57' y 18° 54' de latitud norte y 99° 53' y 100° 51' de longitud oeste.

Tiene una extensión territorial de 857.1 km² que representan el 1.3% de la superficie total estatal Colinda en el norte con los municipios de General Canuto A. Neri y Teloloapan; al Sur General Heliodoro Castillo; al oeste con Arcelia y en el este con Cuetzala del Progreso y Eduardo Neri (González, 2009).

El municipio se caracteriza por un antiguo y macizo terreno arcaico que está constituido por rocas intrusivas y efusivas que se acumularon en el periodo Cámbrico. Como resultado de este fenómeno existe una variedad de elevaciones que inician desde los 250 hasta los 2,000 msnm.

Al norte del municipio se localiza una elevación conocida como peña de Oxtotitlán, inicia en Acatempan y concluye en el pueblo de Nejapa, al sur se localizan pequeñas elevaciones semiplanas que inician en la localidad de Tlatzala y terminan frente a la comunidad de Zacapoxtepec. Al este se localizan las elevaciones que inician en la localidad de Petlacala finalizan al encontrarse por el río Balsas, a estas elevaciones se les une una serie de estribos encontrándose en uno de ellos la carretera municipal. Al oeste se localiza la sierra de Ixtlahuaca (González, 2009).

Los principales rasgos hidrográficos dentro del municipio son todos afluentes del río Balsas y por su caudal los más importantes son: Río Oxtotitlán, nace en el manantial de Sayula al oeste de la ciudad de Teloloapan, hace un recorrido de 67 Km. de norte a sur, que entra en el municipio de Apaxtla por el noroeste en un pequeño cañón. El río Chilapilla, que nace al norte de Petlacala, se dirige hacia el sur para desembocar en el río Balsas, son afluentes de este río las barrancas de la Fundición, la Barranca del Pochote, la Barranca de Tlatzala, la Barranca del Canta Pollo, la del Colorín que también es conocida como la del Naranja y la Barranca del Zoxocotla cerca de Pueblo Nuevo Santa María, pasando al este de Apaxtla, y corre en dirección paralela al río Oxtotitlán, sus aguas no tienen uso y el escurrimiento es discontinuo (González, 2009).

Los pequeños arroyos se encuentran diseminados de la siguiente forma: por el lado norte son tres, la Barranca de la Cambaya, que se une a la Barranca del Agua Fría, la del Agua de los Gatos y la del Tlaxohuilo que pasan dentro de la comunidad; hacia el sur se localiza la barranca del Limón, de Xonacamilca y la de los Tecolotes, los cuales al unirse forman la barranca de las Minas (González, 2009). La granja en estudio se encuentra ubicada a: $18^{\circ} 9' 3.26''$ de latitud norte y $99^{\circ} 56' 28.91''$ de longitud oeste.



Fuente: González, 2009

Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

Aspectos geográficos y demográficos

La extensión territorial de México es de 1.964 millones de km² cuenta con una gran variedad de climas. Dos terceras partes del territorio nacional son áridas o semiáridas, con precipitaciones menores a 500 mm. El sureste del país, en contraste, es húmedo, con precipitaciones promedio mayores a 2000 mm. Una característica de la distribución de la población es que el 54% habita en cotas superiores a los 1,500 msnm.

El Estado de Guerrero se ubica entre los $16^{\circ} 18'$ y $18^{\circ} 48'$ de latitud norte y los $98^{\circ} 03'$ y $102^{\circ} 12'$ de longitud oeste. Limita al norte con los estados de México (216 km) y Morelos (88 km), al noroeste con el estado de Michoacán (424 km), al noreste con el estado de Puebla (128 km), al este con el estado de Oaxaca (241 km) y al sur con el mar Mexicano (océano Pacífico) (500 km), pertenece a la Zona Pacífico Sur. El estado tiene una extensión de 63,794 km², es decir, el 3.2% del total del territorio nacional. Ocupa el lugar 14 en extensión territorial (INEGI, 1999, 2000).

El estado de Guerrero es sumamente montañoso, tiene serranías, además de ser muy irregular, es atravesado por la Sierra Madre del Sur, el Eje Volcánico Transversal origina las sierras de Sultepec y Taxco. Junto con Oaxaca, extiende su territorio por la llamada Depresión Austral, y es recorrido por la sección sureste de la Sierra Madre del Sur. El Eje Volcánico Transversal atraviesa parte de Guerrero, principalmente la Región Norte, mientras que los bosques de coníferas del Estado, son de los más grandes del país, un 14,8 % está en Guerrero (INEGI, 2000).

Más del 60% de la superficie estatal es ocupada por el clima cálido subhúmedo con precipitación en verano, el segundo lugar lo ocupa el clima semicálido con lluvias en verano, con casi la quinta parte del territorio (INEGI, 2009).

De acuerdo al XII Censo de Población y Vivienda efectuado por el INEGI, Guerrero tenía un total de 3, 388,768 habitantes, por lo que ocupa el lugar décimo segundo a nivel nacional. Del total, 1, 645,561 eran hombres y 1, 743,207 eran mujeres. La tasa de crecimiento anual entre 2005 - 2010 fue del 1.7%. El municipio más poblado es Acapulco de Juárez con 789,971 habitantes, y el menos habitado es Juchitán con un total de 7,166 habitantes (INEGI, 1999 Y 2000).

Hidrología

Guerrero es uno de los Estados con más caudales hidrológicos, dentro de la República Mexicana, el estado de Guerrero ocupa el 12^o sitio en cuanto a disponibilidad acuífera, su aprovechamiento es de 602,626 millones de m³. Su territorio es cruzado por uno de los ríos más importantes de México, el Balsas. El estado se encuentra sobre tres regiones hidrológicas. La región 18 del río Balsas, de la que Guerrero ocupa el 31% de la superficie. Tiene como presas más importantes a la Valerio Trujano en Tepecoacuilco, que surte de energía eléctrica a gran parte de la Región Norte. La región 19 de la Costa Grande ocupa el 20% del territorio estatal, y sus ríos más importantes son el Ixtapa, Tecpan, Coyuca, La Sabana, Coyuquilla y Petatlán, además del Atoyac. Por último, la región 20 de la Costa Chica, de la que el 26.4% de la superficie pertenece a Guerrero. No tiene muchos ríos, pero destacan el Nexpa, Ometepec y Papagayo. Los lagos y lagunas más importantes son Potosí, Mitla, Nuxco, Coyuca, Tres Palos, San Marcos (Tecomate), Chautengo, Tila, Huamuxtitlán, Tuxpan, Tixtla, Tecomate (INEGI, 2009).

Vegetación y fauna

La flora está compuesta principalmente por árboles de amate copal (*Protium copal*), cuajote (*Bursera odorata*), organeras (*Pachycereus sp.*), huizache (*Acacia farnesiana*) y palmeras (*Brahea sp.*). Entre los animales más característicos están las iguanas, las serpientes, las lagartijas, las liebres, los conejos y los coyotes. Los animales en peligro de extinción en el Estado de Guerrero son el venado, el jaguar, el águila, la tortuga y la iguana (INEGI, 2009).

Indicadores económicos

El Producto Interno Bruto (PIB) per cápita de México en 2008 fue de 10,235 dólares y la expansión del PIB fue de 1.3% mientras que la inflación fue de 6.53%. Guerrero es uno de los Estados de la República con Producto Interno Bruto

mediano, pues en 2006 registró 130,863.600 pesos, lo que lo situaba en el lugar número 15 a nivel nacional, contribuyendo con el 1,75% del total nacional (INEGI, 2006).

En el 2000 el estado contaba con 2,075,739 guerrerenses en edad de trabajar, el sector primario ocupó 14,276 personas y representaba el 5,6% de la población económicamente activa (PEA), el secundario ocupó a 47,471 personas y representaba el 18,72% por ciento de la PEA y el terciario ocupó 184,869 personas y representaba el 72,92% por ciento de la PEA; es en este último en el que se ocupa la mayor parte de la población debido a que el estado basa su economía en el turismo y el comercio, en el estado produce ajonjolí, café, plátano, cacao, papaya, mango, tabaco, limón, maíz, la explotación forestal también es variada, se utilizan las maderas de pino, encino, cedro y caoba (INEGI, 2006).

La ganadería se practica en el estado, ya que gran parte de su territorio posee pastos, necesarios para favorecer la cría extensiva de todas las especies comestibles de ganado, se crían principalmente ganado caprino y porcino. El comercio es desarrollado en todo el estado, y la ganadería en Costa Chica y la Montaña, en ésta última es de subsistencia. Los productos agrícolas, principalmente los tropicales, van no sólo a los mercados nacionales, sino también al extranjero, principalmente a Estados Unidos (INEGI, 2006).

En Guerrero, se obtienen del subsuelo plata, zinc, petróleo, gas, hierro y mercurio. La industria de la transformación está levemente desarrollada, en las ramas de producción de azúcar, derivados lácteos, hilados y tejidos de algodón, fabricación de celulosa, papel y conservadores. El servicio público se presenta con mayor intensidad en la capital del estado, Chilpancingo. Los municipios de las costas poseen una incipiente pesca, actividad que es principalmente de manutención en

los litorales de la zona, que tiene puertos pesqueros como Zihuatanejo y Acapulco (INEGI, 2006).

Índice y grado de rezago social

El índice de rezago social, calculado por la Comisión Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), incorpora aspectos de educación, de acceso a servicios de salud, de servicios básicos, de calidad y espacios en la vivienda, y activos en el hogar. En los 106 municipios con mayores índices de rezago social, habitaban al 2005 1.4 millones de personas, de las cuales el 70% se encontraban en pobreza alimentaria (incapacidad de obtener la canasta básica alimentaria). La pobreza en Guerrero ocupa el segundo lugar a nivel nacional, superado sólo por Chiapas, aunque en este estado se localiza una de las zonas más pobres de México, la Región Montaña (alta y baja), donde se localiza el municipio más pobre de México, Cochoapa el Grande (CONEVAL, 2008).

5. Hipótesis

A partir de experiencias realizadas en ambientes rurales, con excretas de origen distinto al porcícola y con sistemas de tratamiento basado en biodigestores tubulares, es posible establecer un sistema para el tratamiento de los desechos sólidos y líquidos de una granja porcícola localizada en el municipio de Apaxtla de Castrejón Guerrero. Si se considera la temperatura y la carga orgánica, será posible determinar el tamaño del biodigestor y el tiempo de residencia de los desechos para disminuir significativamente los niveles de contaminación.

6. Objetivos

Objetivo general

Establecer un sistema de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales derivadas de una granja porcina, a partir de su caracterización física, química y biológica; contando con la participación social para la adopción del sistema en el municipio de Apaxtla de Castrejón, Guerrero.

Objetivos particulares

- Caracterizar el agua residual generada en la granja porcícola.
- Diseñar, construir y establecer un sistema de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales de la granja.
- Determinar los requerimientos de inversión para el establecimiento del sistema de tratamiento.
- Promover la participación de los productores en el proyecto.
- Elaborar una guía de diseño, establecimiento y mantenimiento de los biodigestores, para promover su mayor conocimiento técnico y práctico en grupos de productores rurales en la zona.

7. Materiales y Métodos

A partir del funcionamiento de un humedal construido en Apaxtla, productores porcícolas se interesaron en este tipo de sistemas para depurar sus aguas residuales, se realizó una visita de diagnóstico al sitio y la búsqueda de información especializada. A partir del resultado de ambas actividades se realizó el análisis, diseño y redacción del método. Se planteó esta alternativa de tratamiento (Con el biodigestor anaerobio posterior al sistema lagunar; en primera instancia y a continuación un esquema de biodigestores en serie de acuerdo al posterior crecimiento en la producción de la granja).

Para llevar a cabo el trabajo de campo, conjuntamente con académicos y alumnos de la UNAM, participó un grupo comunitario responsable del manejo de una granja porcícola representativa en la región y quien brindó todas las facilidades necesarias para la realización del proyecto (construcción y mantenimiento de biodigestores). Se realizó la caracterización de las aguas residuales, a partir de 3 muestreos (Febrero, Abril y Mayo de 2010), las muestras fueron compuestas como lo indica la NMX-AA-3-1980, además se llevó a cabo un monitoreo del agua residual tratada, de los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre de 2010 así como los meses de Enero y Febrero de 2011.

Los parámetros que se determinaron fueron: DBO_5 , DQO, P_{total} , ST, SDT, SST, SDF SDV, SSF, SSV y S_{sed} , NT, Nitrógeno amoniacal, Nitratos, Nitritos, Fósforo total, Fósforo ortosoluble, Coliformes fecales así como grasas y aceites (Tabla 9).

Tabla 9. Procedimientos analíticos

Parámetro	Métodos analíticos	NORMA OFICIAL MEXICANA
DBO_5	Incubación-dilución	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	Reflujo en placa con $K_2Cr_2O_7$	NMX-AA-030-SCFI-2001
Sólidos en todas sus fracciones	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2001
Nitrógeno como NH_3/NH_4	Fenato	NMX-AA-026-SCFI-2001
Nitrógeno como NO_3	Ácido Fenoldisulfónico	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno como NO_2	Ácido Sulfánilico	NMX-AA-099-SCFI-2006
Nitrógeno total	Método Kjendahl	NMX-AA-026-SCFI-2001
Fósforo total	Fosfomolibdato (UV)	NMX-AA-029-SCFI-2001
Fósforo ortosoluble	Fosfomolibdato (UV)	NMX-AA-029-SCFI-2001
Coliformes totales y fecales	Tubos múltiples	NMX-AA-042-1987
Grasas y aceites	Extracción Soxhlet	NMX-AA-005-SCFI-2000

A partir de la caracterización se evaluaron diferentes alternativas de diseño y construcción considerando criterios ambientales y sociales, así como las características del terreno y la disponibilidad de recursos financieros por parte de los productores.

Se revisaron y adecuaron las recomendaciones de construcción (Martí, 2008) procediéndose a establecer la relación de trabajo con los productores.

8. Resultados

Calidad del agua residual y tratada

Los resultados de la caracterización del afluente porcícola de estudio se presentan en la tabla 10. De acuerdo a Magaña (2002) la granja de Apaxtla, está clasificada como una granja pequeña, ya que maneja 4.5 m³ de agua por día. Los datos del efluente de los biodigestores anaerobios tubulares se presentan en las tablas 11 y 12.

Tabla 10. Caracterización del agua residual de la granja

Parámetro	Concentración (mg L ⁻¹)	Parámetro	Concentración (mg L ⁻¹)
DQO	1,329.0	STDF	914
DBO ₅	1,150.0	STDV	4,402
Nitrógeno orgánico	7.8	STS	20,995
Nitrógeno (NH ₄)	262.4	STSV	2,666
Nitrógeno total	270.8	STSF	18,329
NO ₂ ⁻	0.251	P ortosoluble	3.304
NO ₃ ⁻	5.413	P hidrosoluble	3.155
Grasas y Aceites	146.75	P total	6.455
ST	26,309.0	Coliformes Totales	2,700 NMP/100mL
STD	5,314.0		

ST: Sólidos totales, STD: Sólidos disueltos totales, STDF: Sólidos totales disueltos fijos, STDV: Sólidos totales disueltos volátiles, STS: Sólidos totales suspendidos, STSV: Sólidos totales suspendidos volátiles y STSF: Sólidos totales suspendidos fijos.

Los datos de la caracterización indican que las aguas de origen porcícola contienen una alta carga orgánica 1,329.0 mg L⁻¹ y 1,150.0 mg L⁻¹ de DQO y DBO respectivamente, 26,309 mg L⁻¹ de ST; además lleva consigo un exceso de nutrientes 270.8 mg L⁻¹ de NT y 6.455 mg L⁻¹ de PT propiciando el consumo de oxígeno disuelto para la oxidación de la materia orgánica. Si esta agua es vertida al río Oxtotitlan, se favorecerá su eutrofización y deterioro, además las bacterias coliformes registraron valores de 2700 NMP por 100 mL, provocando riesgo a la salud humana en las poblaciones aledañas. Además, el amonio es tóxico para los

peces e invertebrados acuáticos y la elevada cantidad de contaminantes como: sólidos suspendidos, coliformes y nitrógeno, que contiene el agua residual de la granja, puede contaminar los mantos freáticos asociados al sitio.

Aun cuando los terrenos agrícolas colindantes de la granja pueden absorber el vertido porcícola, existen inconvenientes y riesgos que causan alarma social. El vertido que se produce a lo largo del año no puede aplicarse al terreno agrícola en todo momento, por lo que se estableció un sistema de biodigestores de polietileno tubular, que tienen por objeto abatir malos olores, emisiones de metano, anhídrido carbónico, amoníaco y óxidos de nitrógeno, así como estabilizar la materia orgánica. En este contexto es importante tratar las aguas residuales de origen porcícola, ya que a partir de ellas se pueden obtener subproductos valiosos que pueden pagar una parte de los costos del tratamiento, como son los biodigestores anaerobios tubulares.

El biodigestor anaerobio tubular diseñado, puede tratar una carga orgánica máxima de $6,000 \text{ mg/L}^{-1}$ DQO por día, así como un flujo de $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$, el cual asegura un flujo continuo, por lo tanto el sistema al encontrarse al 75% de su capacidad total (150.7 m^3), el agua residual tratada es desbordada en el otro extremo, desplazada por el agua residual recientemente ingresada al sistema por el tubo de entrada, el 25% restante (50.3 m^3), está ocupado por la fase gaseosa derivada del proceso de biodigestión (Biogás). Estos valores son un punto de partida para la evaluación del sistema, cuya capacidad puede ser mayor dependiendo de la eficiencia que se tenga en el tratamiento. La operación del vaciado de lodos se realiza aproximadamente cada tres meses.

La capacidad instalada de este sistema en la granja no es suficiente hasta el momento para tratar todas las aguas residuales derivadas de esta, ya que la cantidad generada ($20 \text{ m}^3/\text{día}$) es superior a la capacidad de depuración del

sistema, la proyección para el tratamiento de todas las aguas residuales de la granja, es de alrededor de 7 sistemas los cuales trataran de manera integral toda la descarga, respetando los tiempos de retención, con lo cual la eficiencia en la remoción de contaminantes aumentara de manera significativa, así como la obtención una mayor cantidad de biogás y bioabono.

Diseño y construcción.

A continuación se describen los aspectos más relevantes del trabajo. Los detalles de diseño y construcción de este tipo de tratamiento se describen en el manual “biodigestores anaerobios, una alternativa para el tratamiento de aguas residuales derivadas de la porcicultura”. Destacan los criterios de tamaño, materiales, clima, tipo residuo y costos, como uno de los factores determinantes en la toma de decisiones a la hora de diseñar e instalar un biodigestor tubular.

Se cavó una canaleta para la contención de sistema, de 17 m de longitud por 1.1 m de ancho arriba, 0.9 m de ancho en la base y una profundidad de 1 m. Al ser flexible el polietileno tubular fue necesario construir esta canaleta de concreto para su protección, sus paredes interiores se cubrieron con acabado de cemento pulido, de manera que se impidan daños al polietileno así como filtraciones de líquido al exterior, como se observa en las siguientes imágenes. (Figura 4)



Figura 4. Construcción de la canaleta de contención

Materiales necesarios para la construcción de la fosa y los registros de un biodigestor tubular.

- 15 bultos de cemento
- 4 armex
- 2000 tabiques
- 1 m³ de arena

Materiales necesarios para la construcción del biodigestor

- 17 metros de polietileno tubular en negro, calibre 600-800 micrones, de dos metro de ancho
- 1 adaptador macho de PVC de 1 ½” de diámetro
- 1 adaptador hembra de PVC de 1 ½” de diámetro
- 1 válvula de paso de PVC de 1 ½” pulgadas
- 1 metro de tubo de PVC de 1 ½” pulgadas
- 3 metros de tubería de PVC de 4 pulgadas
- 1 tubo de pegamento para PVC
- 1 tubo de sellador de silicón
- 1 rollo de cinta industrial para ductos
- 1 rollo de cinta adhesiva
- Correas de cámara de llanta de bicicleta usadas, de aproximadamente de 5 centímetros de ancho
- 18 metros de polietileno con filtro UV
- 1 lija

Costos

Los materiales necesarios para la construcción de la canaleta de contención, la cual representan un costo aproximado de \$8500, la cual no necesariamente se tiene que construir, ya que el sistema puede quedar contenido en una zanja la cual

puede ser elaborada cavando en el terreno y pulida con arcilla para evitar roturas y rasgaduras, la construcción del biodigestor tiene un costo aproximado de \$1250, con los materiales antes mencionados.

Construcción

Las paredes de la fosa quedaron en un talud de alrededor de 10% de pendiente, la pendiente a lo largo del piso fue de 5%, el biodigestor fue provisto de registros de entrada y de salida. Este registro se hizo de 1 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de profundidad, se construyó con bloques de concreto y quedó separado de la fosa del biodigestor por un muro de tabiques de 20 cm de ancho.

Se extendió el tubular de polietileno calibre 600 micrones, negro de 2 m de diámetro y 17 m de largo, sobre un piso seco, firme, sin piedras u objetos que pudieran rasgarlo; se realizó una pequeña perforación a la mitad de su extensión; por la ranura se introdujo el extremo roscado de un conector macho de PVC de 1½" de diámetro, una vez salida la rosca al exterior del tubular, se le insertó un empaque de hule para asegurar el correcto cierre de la rosca, luego se procedió a enroscar el conector hembra dándole el ajuste exacto, en el exterior del adaptador hembra se colocó un pedazo de tubo el cual a su vez se conectó con la llave de paso para la extracción del biogás. (Figura 5)

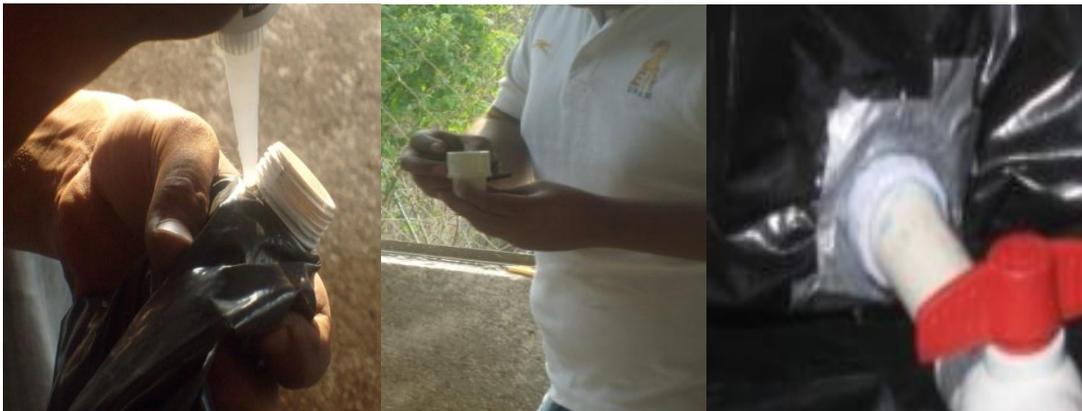


Figura 5. Instalación de la válvula de salida del biogás

Con la estructura extendida sobre el piso y la salida de gas en el centro y hacia arriba, con los extremos atados y asegurados con cinta industrial, la bolsa del biodigestor se llevó a la fosa, colocándola en el piso de la misma, colocándola dentro de la canaleta de contención y se procedió a acomodar los tubos de entrada y salida, ajustando los niveles tanto de entrada como de salida. (Figura 6)



Figura 6. Instalación del biodigestor, dentro de la canaleta de contención

A continuación se amarró por sus extremos a tuberías de PVC de 4" de diámetro, con tiras de liga reusadas de las cámaras de llantas de bicicleta y posteriormente selladas con cinta industrial adhesiva. (Figura 7)



Figura 7. Amarres con las cámaras de llantas, en los extremos del digestor.

Con este sistema, se calculó convenientemente la inclinación de entre 35° - 50° de dichas tuberías, obteniendo un tanque hermético de aproximadamente 200 m^3 de capacidad.

Se introdujeron aproximadamente 3 Kg de estiércol de res como inóculo. (Figura 8). Posteriormente, se procedió al llenado del biodigestor, labor que se hizo introduciendo la mezcla de estiércol y agua a una relación de 1:4 por el tubo de entrada, el cual condujo el agua residual directamente de las galeras, hacía el sistema, por medio de una tubería conectada desde el sitio de la descarga. El biodigestor se llenó hasta 60% de su capacidad y se verificó que no quedaran fugas de agua o gas durante el llenado y funcionamiento, que de ser encontradas fueron reparadas con cinta de ductos y selladas con silicón.



Figura 8. Introducción del inóculo de estiércol de res al biodigestor

En el biodigestor se alcanzó finalmente un equilibrio de nivel hidráulico, por el cual, tanta cantidad de estiércol mezclado con agua es agregada, es expulsado por el otro extremo el mismo volumen que ingreso recientemente, para asegurar una atmósfera anaeróbica. (Figura 9). Además de generar biogás, la digestión anaerobia de la materia orgánica (estiércol) produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes, promoviendo el aprovechamiento tradicional de los residuos animales con fines fertilizantes o como combustibles.



Figura 9. Salida del sistema

Es importante hacer un seguimiento posterior, puesto que el biodigestor tardará tantos días como el tiempo de retención se haya considerado para entrar en plena producción de biogás y fertilizante. Esto requirió de dos meses cargando diariamente el biodigestor el cual a los 20 días se obtuvo metano, en esta etapa de acompañamiento a los campesinos se les demostró el cumplimiento de uno de los objetivos.

Después de 4 semanas de funcionamiento se realizó la caracterización del efluente líquido a partir de los parámetros de la tabla 9. Actualmente se continúa proporcionando asesoramiento técnico para la construcción y diseño de dos biodigestores y capacitando a familias, técnicos locales y asociaciones de productores a través de un taller.

La aportación de la UNAM a través del Laboratorio de Proyectos Ambientales fue el diseño del sistema de biodigestores, el costo de los materiales de los biodigestores y la determinación analítica, así como las horas hombre en la capacitación y asesoría.

8.1 Análisis y discusión

El control de los biodigestores a lo largo del tiempo se realizó considerando los valores de DQO, DBO, SST, SST, SSV, N y P en sus diferentes formas. Los resultados obtenidos en el efluente de los biodigestores son los siguientes:

Tabla 11. Caracterización del efluente del biodigestor I

Parámetro Mes	DQO mgL ⁻¹	DBO ₅ Mg L ⁻¹	N-org mg L ⁻¹	N-NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	N-total mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ Mg L ⁻¹	G y A mg L ⁻¹	Coliformes Totales NMP	Fósforo Ortosoluble mg L ⁻¹
SEP	944.92	99.30	10.24	126.0	136.0	2.6X10 ⁻⁴	0.127	46.8	231	3.85
OCT	1,043.47	150.30	15.14	98.0	113.14	1.6X10 ⁻⁴	1.806	32.93	45	1.64
NOV	896.32	44.40	20.2	22.4	42.56	1X10 ⁻⁴	0.059	71.46	< 2	1.32
ENE	374.154	340.15	17.9	11.2	29.10	4.7X10 ⁻⁴	2.900	50	< 2	1.45

Parámetro Mes	Fósforo Hidrosoluble mg L ⁻¹	Fósforo Total mg L ⁻¹	ST mg L ⁻¹	STD mg L ⁻¹	STDF mg L ⁻¹	STDV mg L ⁻¹	STS mg L ⁻¹	STSV mg L ⁻¹	SSTF mg L ⁻¹
SEPT	0.16	4.97	3,652	2,372	190	1,236	1,280	1,260	20
OCT	1.33	4.92	3,500	3,433	1,680	2,272	67	64	3
NOV	1.375	1.864	3,334	3,273	1,865	1,408	61	51	10
ENE	2.39	3.84	6,700	3,730	2,260	1,470	2,970	2,940	30
FEB	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ST: Sólidos totales, STD: Sólidos disueltos totales, STDF: Sólidos totales disueltos fijos, STDV: Sólidos totales disueltos volátiles, STS: Sólidos totales suspendidos, STSV: Sólidos totales suspendidos volátiles, SSTF: Sólidos totales suspendidos fijos, G y A: Grasas y aceites.

Tabla 12. Caracterización del efluente del biodigestor II

Parámetro Mes	DQO mgL ⁻¹	DBO ₅ mg L ⁻¹	N-org mg L ⁻¹	N-NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	N-total mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	G y A mg L ⁻¹	Coliformes Totales NMP	Fósforo Ortosoluble mg L ⁻¹
OCT	1,614.49	410.44	17.34	100.8	118.14	1.5X10 ⁻⁴	0.699	175.14	0	4.7
NOV	1,125.84	324.3	34.70	39.3	73.92	2.8X10 ⁻⁴	0.090	164.26	1,898	3.2
FEB	598.627	544.21	21.2	69.1	90.35	1.2X10 ⁻⁴	0.227	122.43	20	2.031

...continuación tabla 12.

MES	P. Hidrosoluble	P. Total	ST mg L ⁻¹	SDT mg L ⁻¹	SDTF mg L ⁻¹	SDTV mg L ⁻¹	SST mg L ⁻¹	SSTV mg L ⁻¹	SSTF mg L ⁻¹
OCT	1.494	4.127	10,372	1,152	3,737	1,753	9,257	1,214	3,655
NOV	1.543	3.77	25,785	2,3159	4,475	18,414	2,626	726	1,906
ENE	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
FEB	1.943	3.974	5,820	5,580	620	4,960	240	20	220

ST: Sólidos totales, STD: Sólidos disueltos totales, SDTF: Sólidos totales disueltos fijos, SDTV: Sólidos totales disueltos volátiles, STS: Sólidos totales suspendidos, STSV: Sólidos totales suspendidos volátiles, STSF: Sólidos totales suspendidos fijos, G y A: Grasas y aceites.

Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno

La cantidad de DBO₅ generada por la actividad porcícola presenta datos muy variados, estos dependen en gran medida de la cantidad y tamaño de animales, así como el manejo de los residuos antes de generar la descarga. Además, es relevante el tipo de actividad desarrollada en la granja, ya que puede ser dedicada exclusivamente a la maternidad, destete, engorda o de ciclo completo, siendo estas últimas las que más carga orgánica generan. De acuerdo con Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA, 2009) la carga orgánica de las granjas porcícolas varían significativamente y los valores oscilan desde 2,500 mg L⁻¹ hasta los 15,000 mg L⁻¹, de ahí la importancia de este tipo de trabajos para poder conocer las condiciones de diseño, operación y mantenimiento de los biodigestores, para hacerlos funcionales y más eficientes logrando un menor impacto negativo en el ambiente.

En el biodigestor I, durante los primeros 2 meses de trabajo no se observan remociones significativas, esto debido a el establecimiento de las poblaciones bacterianas dentro del sistema, las cuales son las encargadas de llevar acabo los procesos de remoción de los contaminantes, a partir del tercer mes de inicio de operaciones, se observó, que la fermentación anaerobia removi6 un 29% de DQO y 91% de DBO₅, mientras que en noviembre se obtuvo una remoci6n de DQO del 72% y de DBO₅ de 96%. Sin embargo, en el agua residual qued6 un remanente

que contiene compuestos nitrogenados así como fósforo, los cuales no son removidos de forma significativa por la digestión anaerobia y que por consiguiente requieren de otro tratamiento para su transformación para así poder disponer de manera adecuada el agua residual, siendo el fósforo, el que menores tasas de remoción presenta para este tipo de sistemas, el segundo sistema presento un comportamiento similar, donde los primeros dos meses presenta tasas bajas de remoción comenzando a estabilizarse hacia el tercer mes, posteriormente se vacía el biol. Si es necesario se desarrollan labores de mantenimiento del sistema, si se presentan fugas, se reparan ya que puede disminuir su eficiencia en las tasas de remoción de contaminantes.

Destaca que los valores de DQO presentes en la granja ($1,329 \text{ mg L}^{-1}$ DQO) están por debajo de los reportados para las industrias textil, de la curtiduría y de las melazas ($2,500$, $2,587$ y $80,000 \text{ mg L}^{-1}$ DQO respectivamente). Cabe mencionar que antes del establecimiento del sistema solamente la granja funcionaba con una galera con 250 puercos de tamaño pequeño y mediano, posteriormente se amplió a tres galeras con porcinos adultos.

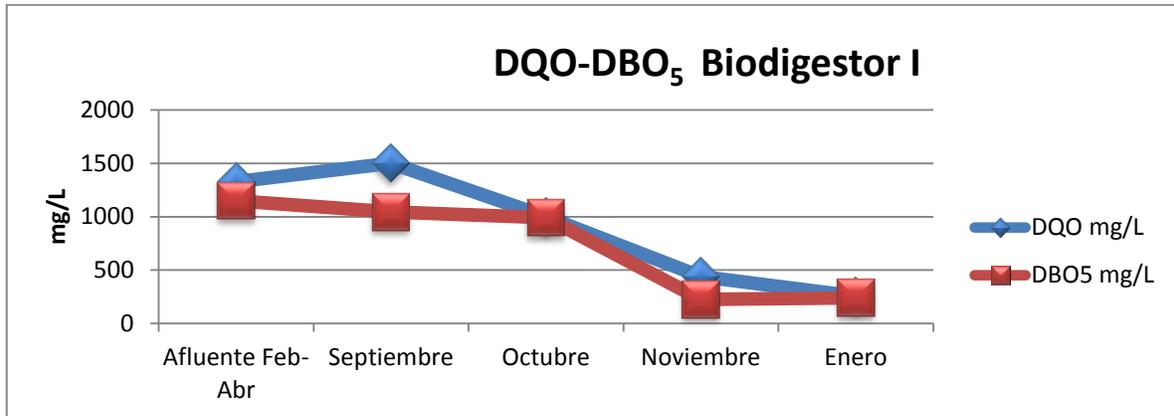
El digester empezó a estabilizarse a partir de los 90 días de funcionamiento, manteniendo una eficiencia de remoción promedio de 68%. La tendencia al decaimiento en la eficiencia de remoción se debe a las actividades de mantenimiento y vaciado de la materia orgánica degradada y mantenida dentro del sistema (biol) después de 3 meses.

El elevado contenido de materia orgánica (DQO y DBO) ubica a la descarga de la granja como uno de los principales problemas a atender. En México no existen normas que regulen la descarga de este tipo de efluentes tanto en suelos como en cuerpos de agua. La importancia de contar con una norma específica para este tipo de residuos puede verse al comparar los datos reportados por la NOM-001-

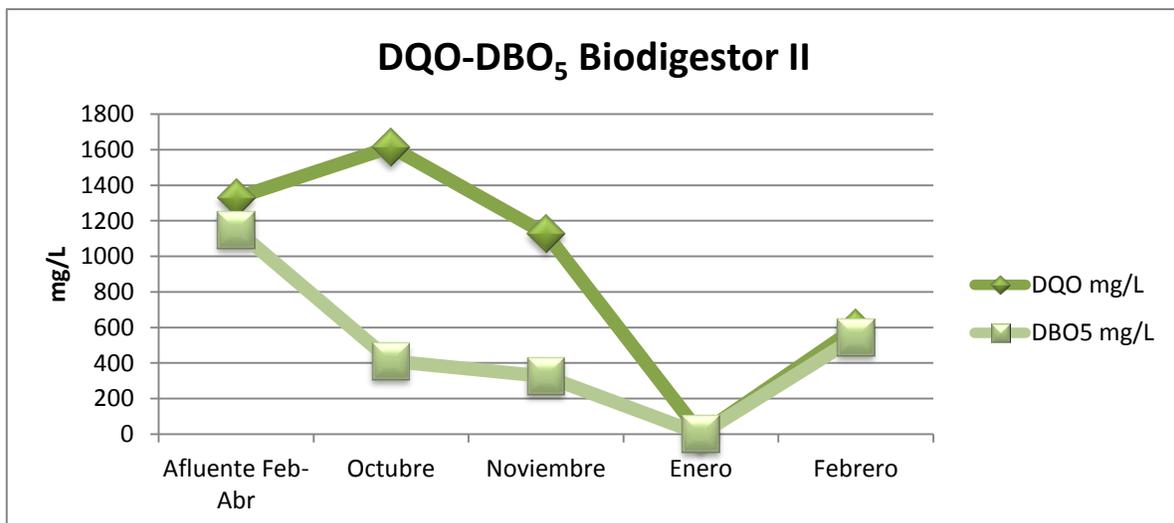
SEMARNAT-1996, para los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales. Ahí se señala que las descargas de aguas residuales en ríos tienen un límite para DBO de 60 mg L^{-1} , los cuales son muy inferiores a los obtenidos en este trabajo y de igual manera en los monitoreos de septiembre de 2010 (99.3 mg L^{-1}), octubre de 2010, (150.3 mg L^{-1}) y enero de 2011 (340.15 mg L^{-1}) excepto para noviembre donde no se rebasó el límite máximo permisible (40.4 mg L^{-1}) (gráficas 1 y 2).

A los 20 días de funcionamiento del biodigestor, los operarios observaron el aumento del volumen de la campana destinada al biogás, demostrándose mediante la ignición del gas que la fase de metanogénesis se alcanzó, proceso relacionado directamente con la disminución de DQO y comprobada mediante la quema del gas a través de la válvula de salida del gas. De acuerdo a Correa y Sierra (2004) en los primeros días de estabilización se presenta una competencia entre organismos heterótrofos y autótrofos, originada por la presencia de DQO carbonácea, lo cual desde el punto de vista bioquímico se convierte en una gran desventaja para los organismos autótrofos. Evaluación que se infiere a partir de los resultados de los sólidos totales suspendidos volátiles en donde su concentración disminuye como se observa en la tabla 11. Mientras que en condiciones anóxicas y anaerobias, los organismos emplean compuestos inorgánicos oxidados y materia orgánica como aceptores de electrones (Rittman, 2001).

Gráfica 1.



Gráfica 2.

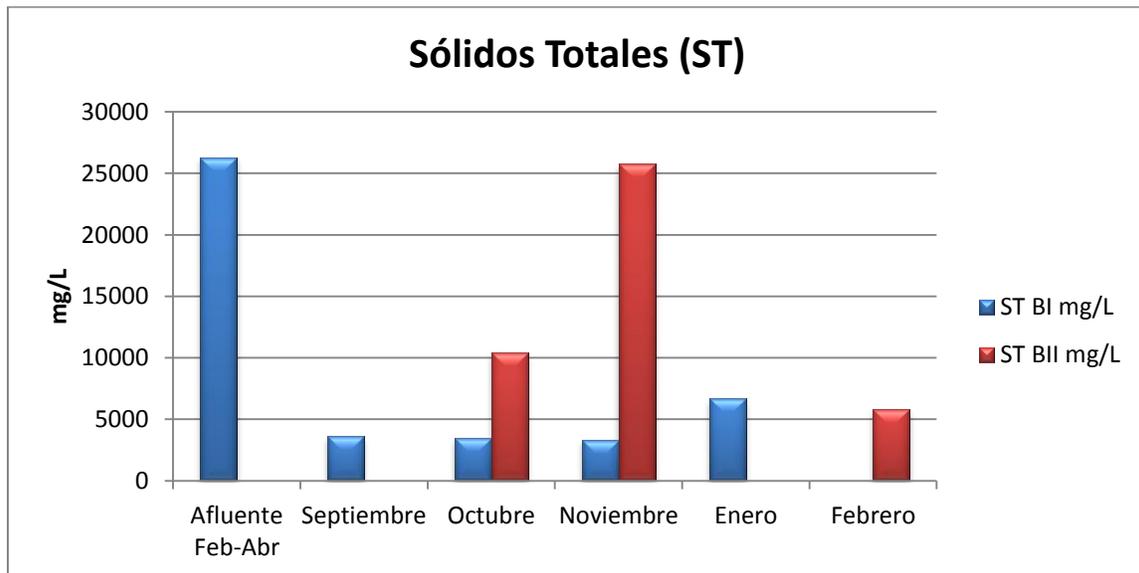


En comparación con otros trabajos reportados para industria porcícola, presentan remociones de hasta el 90% en sistemas de tratamiento anaeróbicos, de acuerdo a datos del IMTA (2009) donde se trabajaron con reactores anaeróbicos híbridos, contando con dos diferentes tratamientos, el aeróbico y el anaeróbico para el tratamiento de descargas derivadas de la porcicultura, así como los datos reportados por Marín, *et. al.*, (2002), donde el tratamiento de este tipo de descargas estaba compuesto solamente por biodigestores, en los cuales se alcanzaron porcentajes de remoción del 70%.

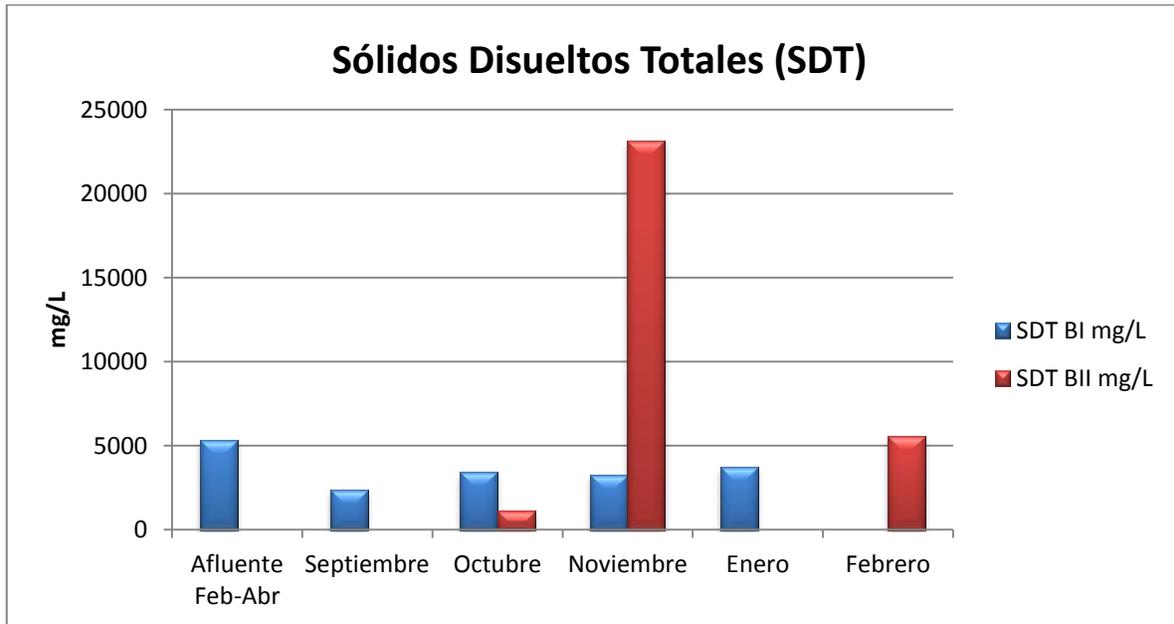
Sólidos

Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados pueden constituir una parte importante de la DBO_5 de los efluentes, de ahí la necesidad de removerlos o en este caso transformarlos hacia fracciones en las cuales se promueva el proceso de metanogénesis, mediante la cual se eliminan una elevada cantidad de sólidos, con la consecuente disminución de la DBO_5 , mejorando la calidad de la descarga. El periodo de adherencia se controló mediante el seguimiento de los sólidos suspendidos volátiles (Gráficas 6 y 8) y la eficiencia de remoción de DQO en el efluente. La cantidad de solidos totales es alta, en la caracterización se obtuvieron $26,309 \text{ mg L}^{-1}$, de este total $20,995 \text{ mg L}^{-1}$ corresponden a la fracción suspendida (Gráfica 7), $5,314 \text{ mg L}^{-1}$ a la fracción disuelta que equivale al 20% (Gráficas 4). Del total de solidos el 27% corresponde a la fracción volátil (Gráficas 6 y 8). A tres meses de funcionamiento del sistema, el 87% de los sólidos totales fueron removidos, el 44% correspondía a la fracción volátil y el 98% de los sólidos totales correspondía a la fracción disuelta.

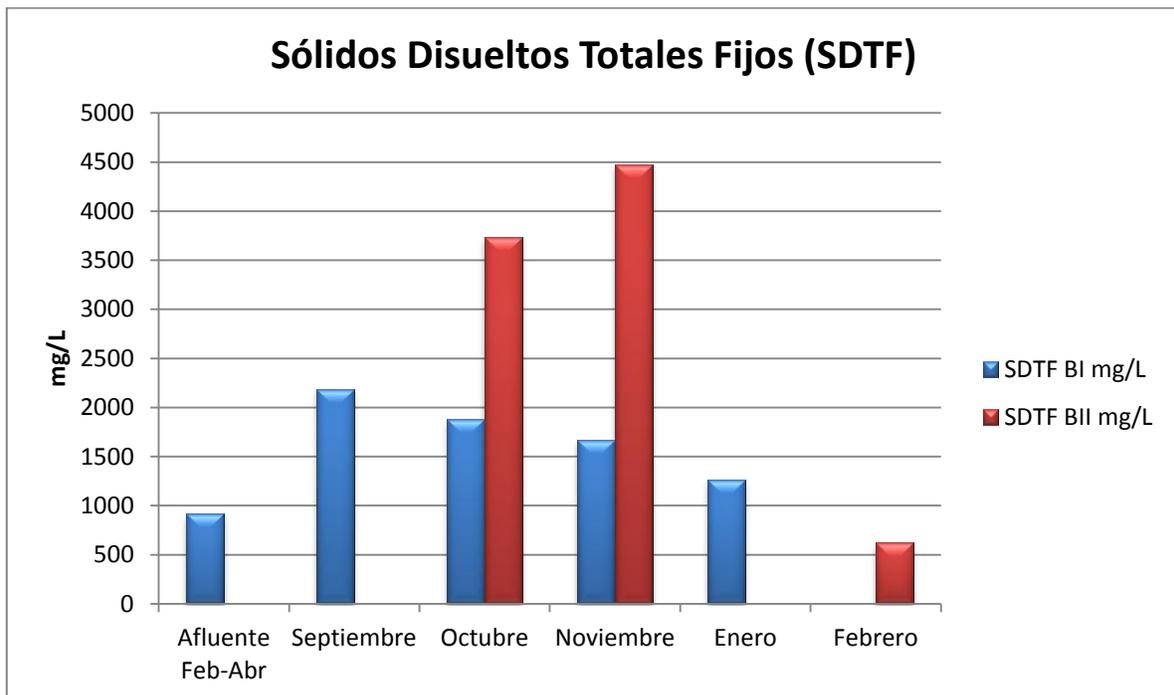
Gráfica 3.



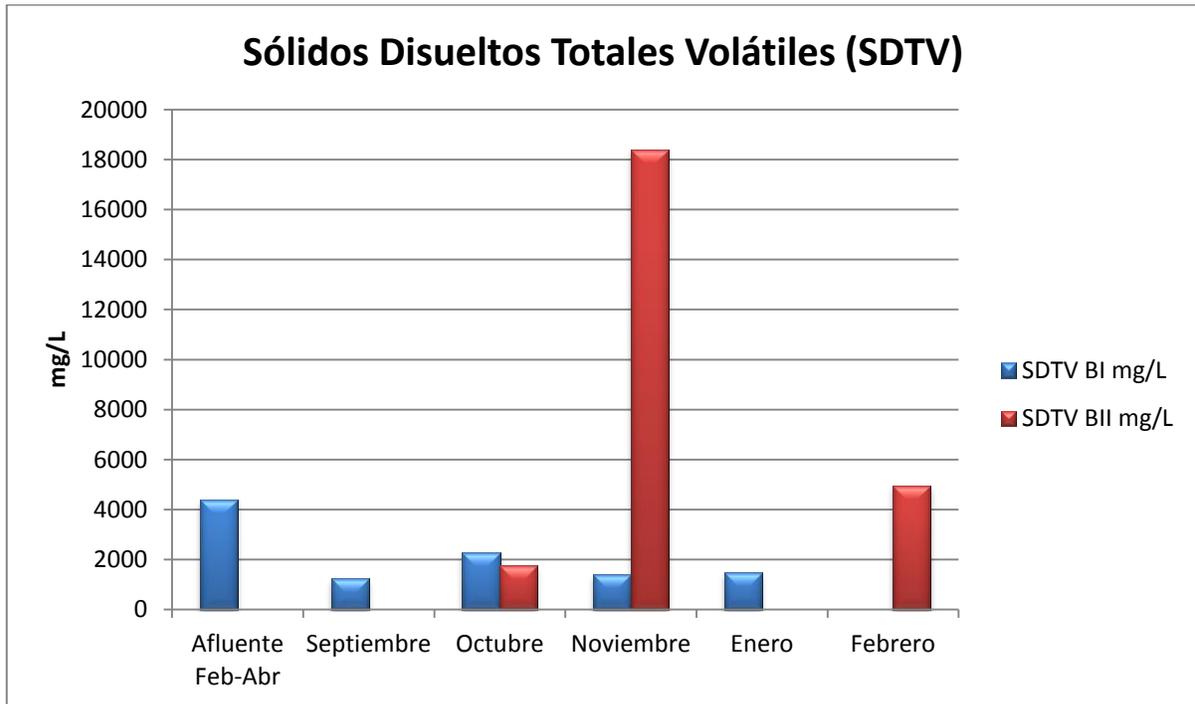
Gráfica 4.



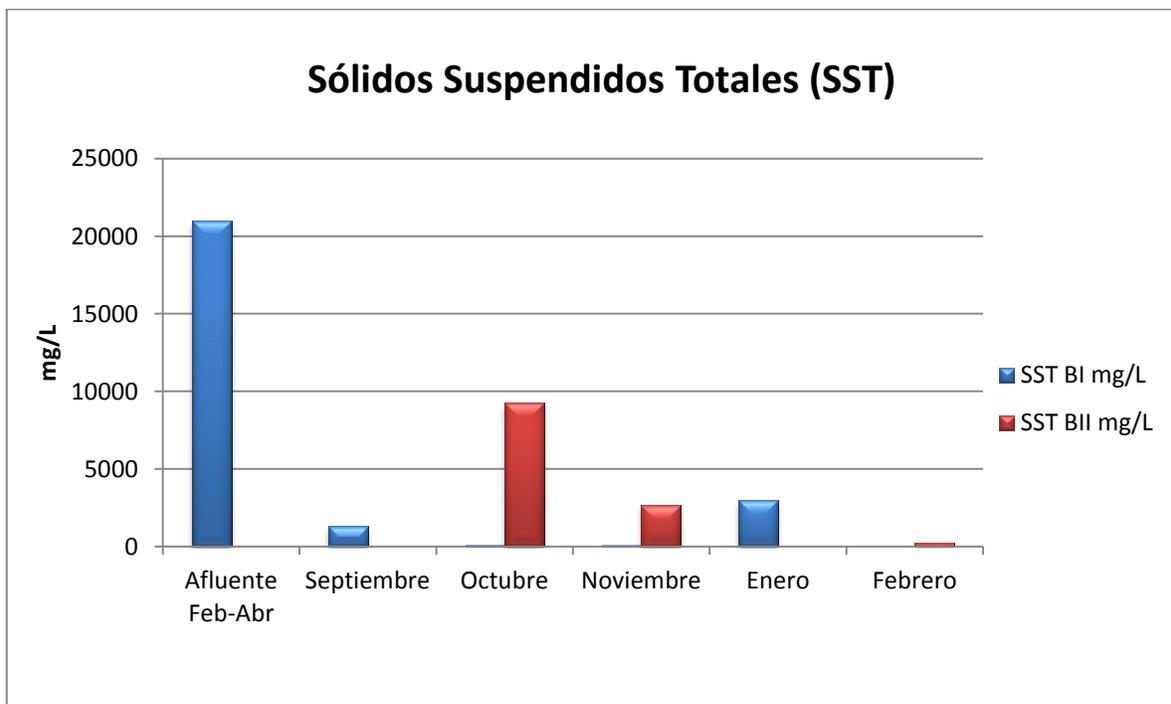
Gráfica 5.



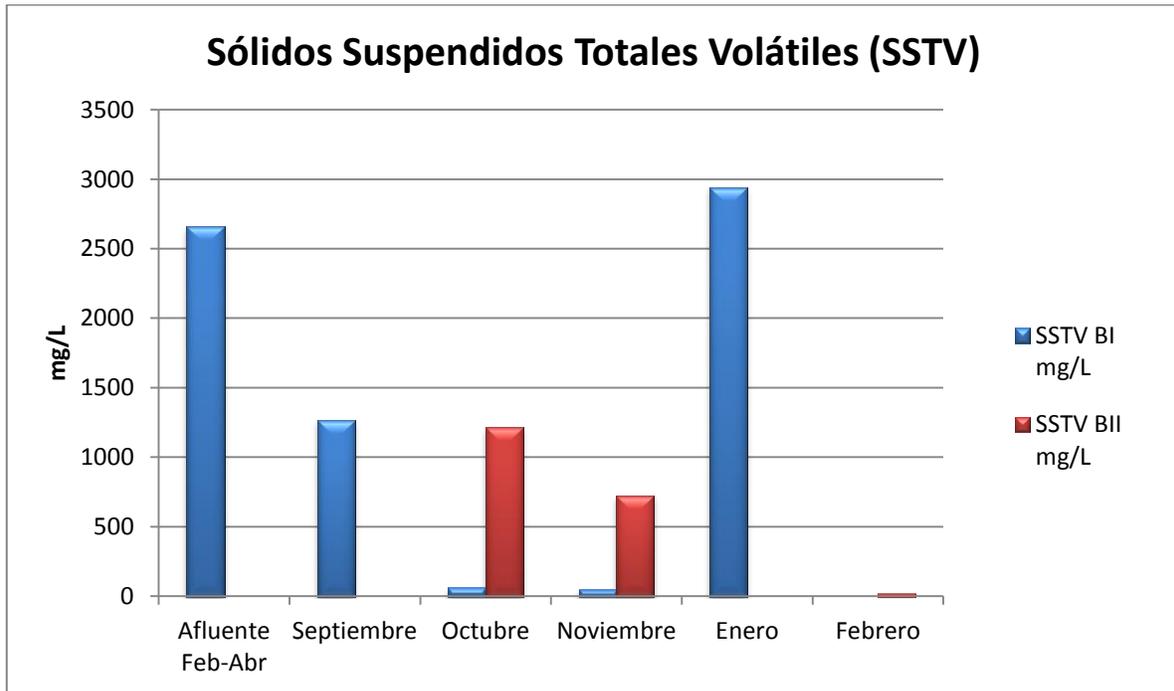
Gráfica 6.



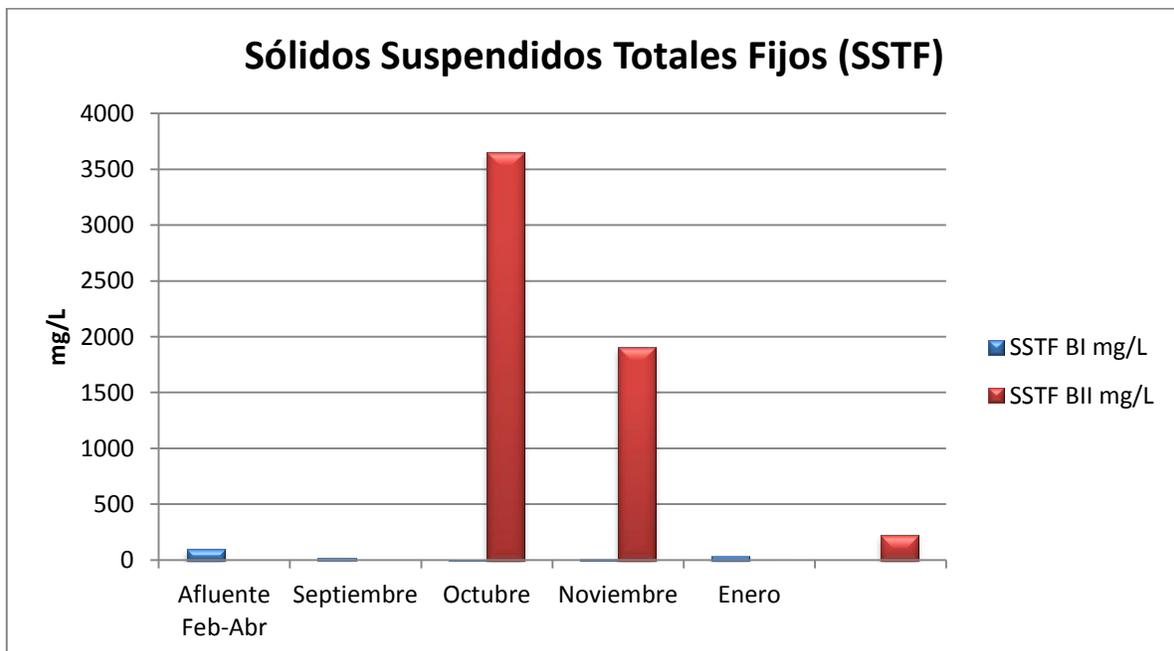
Gráfica 7.



Gráfica 8.



Gráfica 9.



Es necesario promover la producción sólidos volátiles para que de esta manera se acelere el proceso de la degradación de la materia orgánica con su consecuente producción de metano, garantizando un sistema totalmente anaerobio. Se obtuvo la remoción de una cantidad significativa de sólidos en sus diferentes fracciones, al igual que IMTA (2009), donde se obtuvo una remoción similar de sólidos totales, con una eficiencia de remoción del 85%, demostrando que estos sistemas tienen una alta eficiencia en cuanto a la remoción de sólidos se trata, existen repuntes en algunos meses, los cuales están asociados al mantenimiento y vaciado del “BioI” así como el Bioabono de los sistemas.

Nitrógeno y Fósforo.

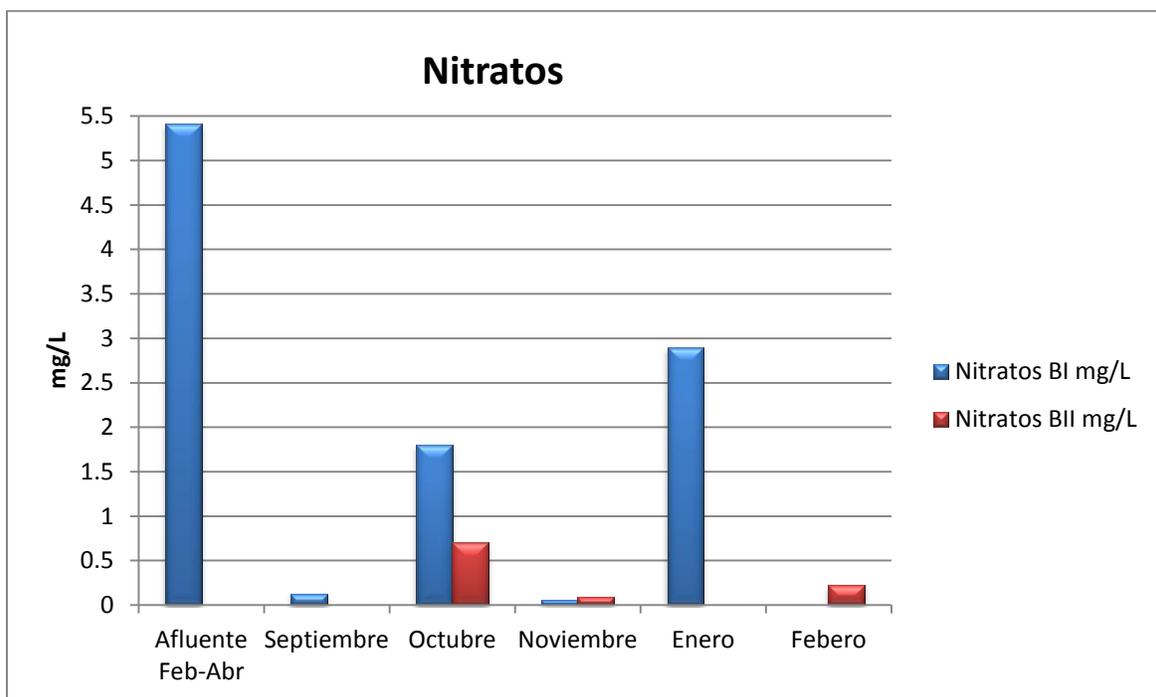
La remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales es un tema sobre el cual se ha venido tomando conciencia de su importancia en los últimos años. La descarga de nitrógeno y fosforo en cuerpos de agua provoca serios problemas de eutrofización, conjuntamente con esto, el nitrógeno vertido como nitrógeno amoniacal en medios aerobios puede llegar a contaminar fuentes subterráneas o superficiales de agua potable, lo que es perjudicial para la salud humana.

Nitrógeno

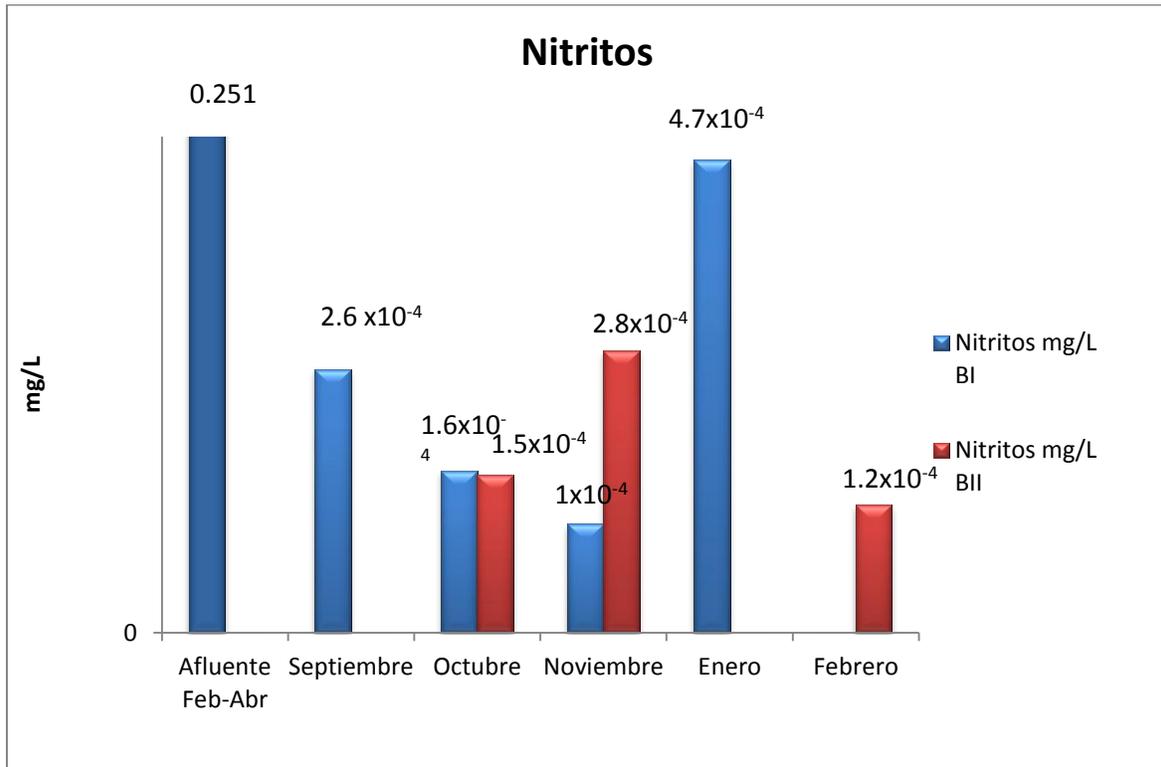
En los biodigestores, al ser sistemas anaeróbicos los que se promueve es el proceso de desnitrificación en el cual por acción de las bacterias, el nitrógeno (urea y proteínas principalmente, así como NO_2^- y NO_3^-) es eliminado en forma de N_2 y NH_4^+ . La remoción de nitratos fue significativa desde el primer mes de funcionamiento alcanzando un 48% de remoción hacia el tercer mes de funcionamiento en el biodigestor I y de 38% en el biodigestor II, teniendo un comportamiento similar al primer sistema. Al quinto mes se alcanzaron remociones de 96% y 85% en los biodigestores I y II, respectivamente. Los resultados indican una remoción significativa. (Gráfica 10)

Los nitritos presentan decaimientos importantes y el porcentaje de remoción fue mayor al 90% desde el primer mes de funcionamiento, esto debido a la naturaleza anóxica del sistema donde este proceso no puede ser llevado a cabo, se tuvo una disminución en la eficiencia del proceso de remoción debido a las labores de limpieza y vaciado del sistema, la eficiencia en la remocion decae como consecuencia del proceso de purga de los biodigestores (Enero y Febrero). (Gráfica 11)

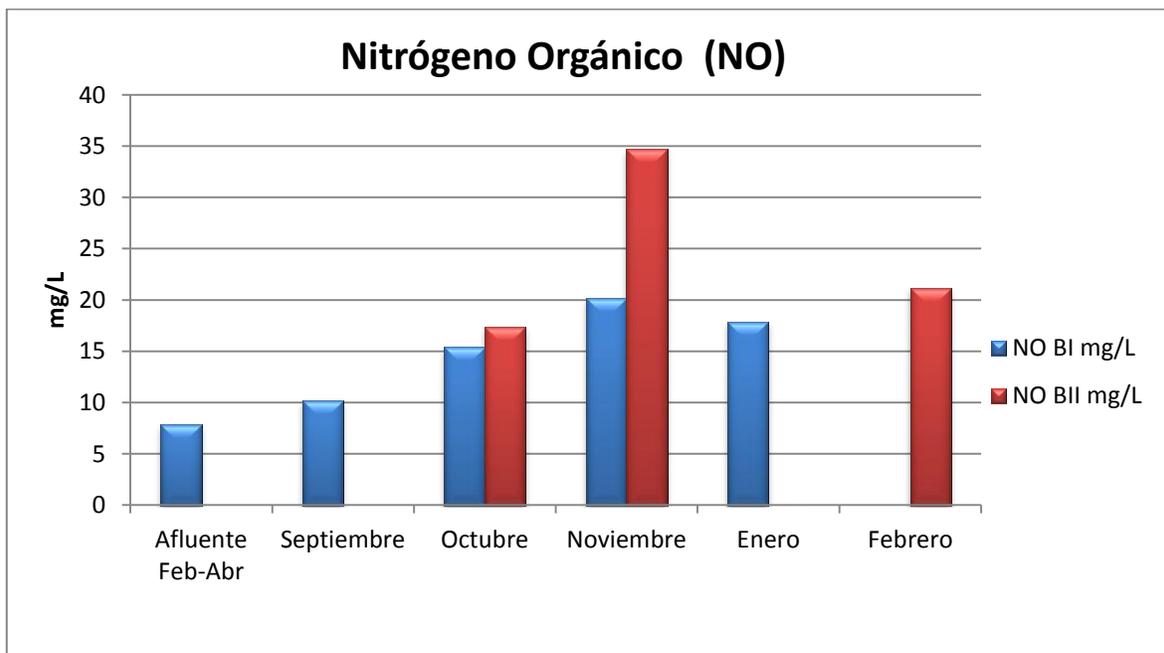
Gráfica 10.



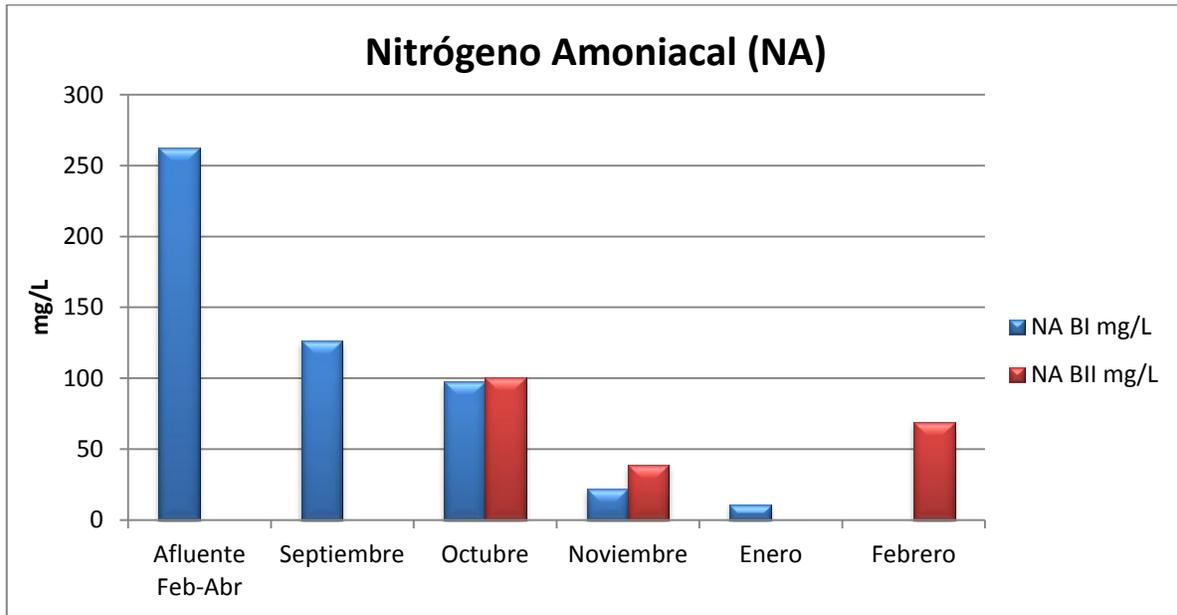
Gráfica 11.



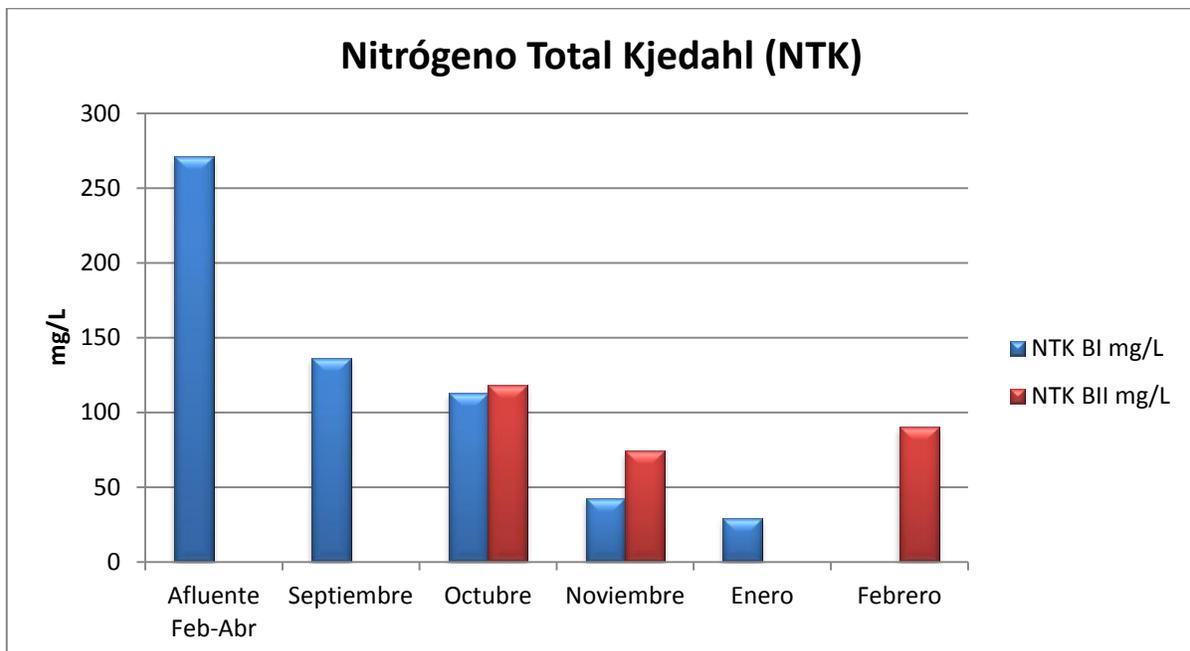
Gráfica 12.



Gráfica 13.



Gráfica 14.



A los tres meses de funcionamiento de los biodigestores, la concentración de nitratos presentó un decremento importante, desde 5.413 mg L^{-1} hasta 0.059 mg L^{-1} en el biodigestor I y a 0.69 mg L^{-1} en el biodigestor II, este decremento coincide con la disminución de la concentración de nitrógeno total, desde 136.0 mg L^{-1} a 29.1 mg L^{-1} en el biodigestor I, y de 118.0 mg L^{-1} a 73.9 mg L^{-1} en el biodigestor II (Gráficas 10) . A partir de ese momento la remoción de NT comienza a incrementarse y se puede considerar significativa, existiendo una tendencia al decaimiento de este donde pasa de 270.8 mg L^{-1} a 29.10 mg L^{-1} y a 90.35 mg L^{-1} para el primer y segundo sistema, respectivamente (Gráfica 14), así como una disminución importante de nitritos de 0.251 mg L^{-1} a $2.6 \times 10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$ en el biodigestor I y a $1.2 \times 10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$ en el segundo sistema, lo que representa un 99% de remoción (Gráfica 11), esto es muy importante debido, a que esta fracción del nitrógeno, es considerada como tóxica. Existen repuntes en el mes de Enero para el biodigestor I y en Febrero para el biodigestor II, estos incrementos están asociados con las labores de vaciado y limpieza de los sistemas.

Este tipo de sistemas remueve una importante cantidad de nitrógeno en hasta un 95%, en comparación con lo reportado por Correa y Sierra (2004), donde manejan porcentajes de remoción del 70%, así como los reportados por Pedraza *et.al.*, (2001) y el IMTA (2009), donde manejan porcentajes de remoción del 20%, esto es importante ya que estos nutrientes son uno de los principales implicados en la contaminación de los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos, cuando son descargados en altas concentraciones.

Fósforo

La remoción biológica del fósforo requiere de un ambiente estrictamente anaerobio con una cantidad suficiente de sustrato orgánico de rápida biodegradación, en esta etapa de anaerobiosis, las bacterias toman del medio la materia orgánica

fácilmente biodegradable, utilizándola como material de reserva, lo que da origen a la liberación del fosfato al exterior de la célula.

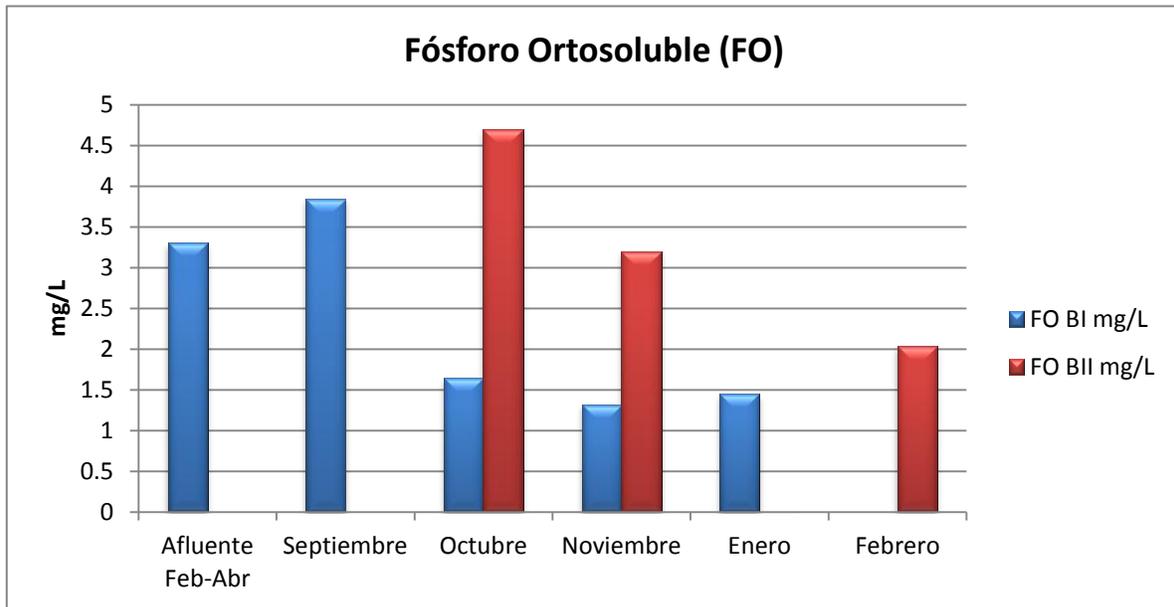
Se presenta una baja tasa de remoción de las diferentes formas de fósforo (fósforo total y polifosfatos). El fósforo ortosoluble paso de 3.304 mg L^{-1} a 1.45 mg L^{-1} y a 2.03 mg L^{-1} para el primer y segundo sistema, respectivamente (Gráfica 15), el fósforo total paso de 6.485 mg L^{-1} a 4.97 mg L^{-1} en el primer sistema y a 4.127 mg L^{-1} en el segundo sistema (Gráfica 17), presentando porcentajes de remoción menores al 20%, al igual a lo reportado por Martí *et. al.*, (2002) con una remoción del 20%, esta baja remoción.

El nivel de fósforo liberado en la fase anaerobia dependen de la cantidad y el tipo del sustrato disuelto disponible, así mismo se debe promover la eliminación de los nitratos, ya que estos crean una acción adversa en la eliminación de fósforo, porque los óxidos de nitrógeno disminuyen la cinética de liberación de fósforo. Los organismos bioacumuladores de fósforo al entrar en contacto con una fase anaerobia, y en presencia de ácidos grasos de bajo peso molecular, rompen e hidrolizan las cadenas de polifosfatos almacenados dentro de la célula, liberando el fosfato al seno del líquido. La energía del enlace que de esta forma se libera, es usada para absorber, acomplejar y almacenar ácidos grasos de bajo peso molecular dentro del organismo.

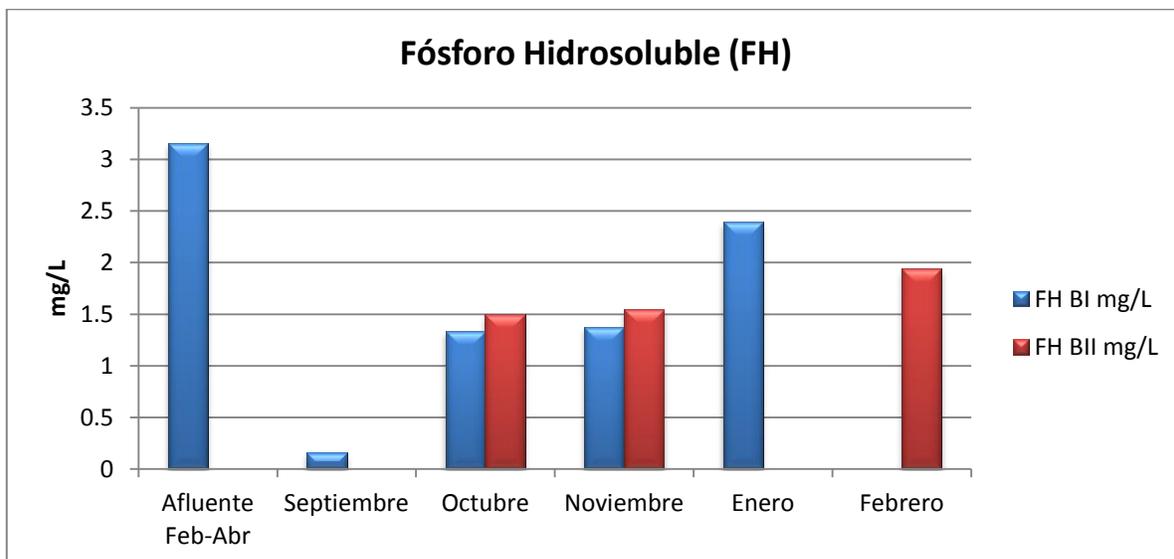
Se prefieren los ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular como sustrato ideal para regular la tasa y el nivel de fósforo liberado en la fase anaerobia, esto depende de la cantidad de sustrato disuelto disponible para captarlo y almacenarlo en forma de poli- β -hidroxibutirato. Si tenemos una cantidad importante de ácidos grasos volátiles como subproducto para que la DQO se consuma y el fósforo se libere.

De ahí la necesidad de implementar un sistema para el pulimento del efluente de acuerdo a Correa y Sierra (2004) es necesario un sistema de tratamiento en el cual se combinen dos tipos de sistemas el aerobio y el anaerobio, para que de esta manera nutrimentos como el fósforo puedan ser eliminados de manera significativa del efluente.

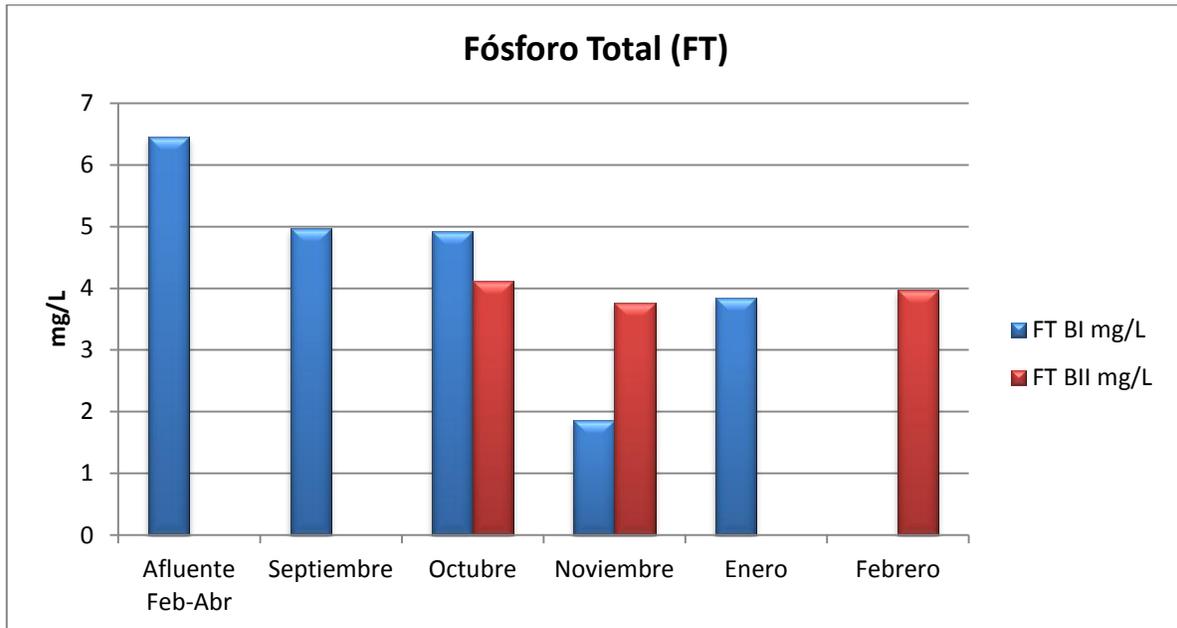
Gráfica 15.



Gráfica 16.



Gráfica 17.



Estos resultados concuerdan con la generalidad aplicada a diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales, en los cuales se reportan bajos niveles de remoción de fósforo (de entre 40 y 60%, según el tipo de tratamiento).

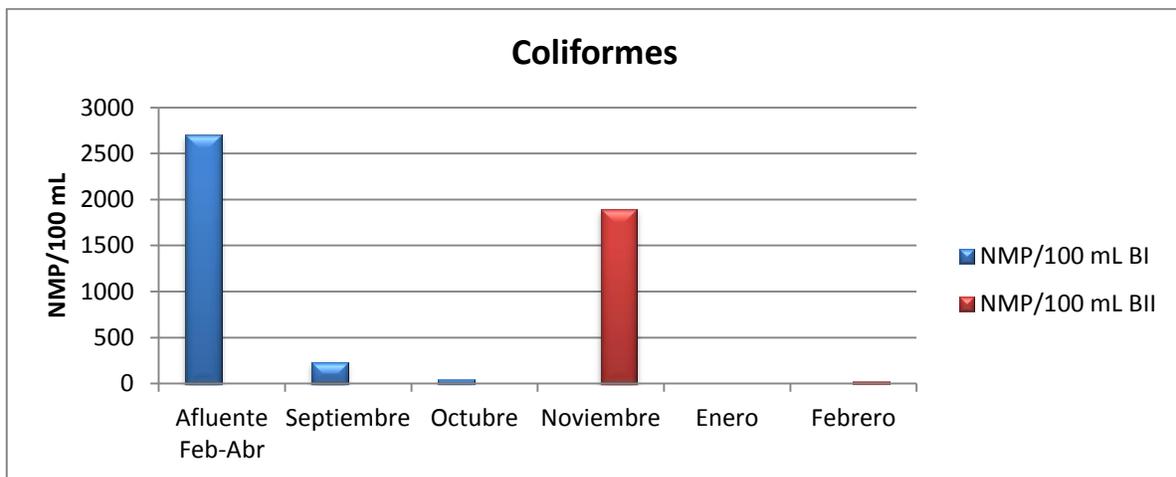
Coliformes totales

Los problemas más graves son causados por la trasmisión de gérmenes patógenos de un cerdo a otro, hacía otros animales y al humano, por la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, así como por el impacto negativo al suelo superficial. La contaminación del aire por los olores generados, puede ser también pronunciada, atrayendo fauna nociva (moscas) y alejando especies nativas.

Se registraron resultados positivos, ya que en el efluente de la granja se cuantificaron 2,700 organismos coliformes por cada 100 mL, y en el efluente del biodigestor tubular I se registraron 231 organismos coliformes por cada 100 mL al 3^{er} mes de funcionamiento, a 45 organismos coliformes en el 4^o mes y menor de 2

en los 5° y 6° mes. En tanto que el biodigestor II, registró en noviembre 1,898 organismos coliformes por cada 100 mL, asociados a las labores de limpieza y mantenimiento, alcanzó una remoción importante en febrero con 20 organismos coliformes por cada 100 mL (gráfica 18). Se registró 95% de remoción de organismos coliformes, a diferencia de lo reportado por Marín *et. al* (2002) para este tipo de sistemas, donde solamente presento un porcentaje de remoción del 20%.

Gráfica 18.



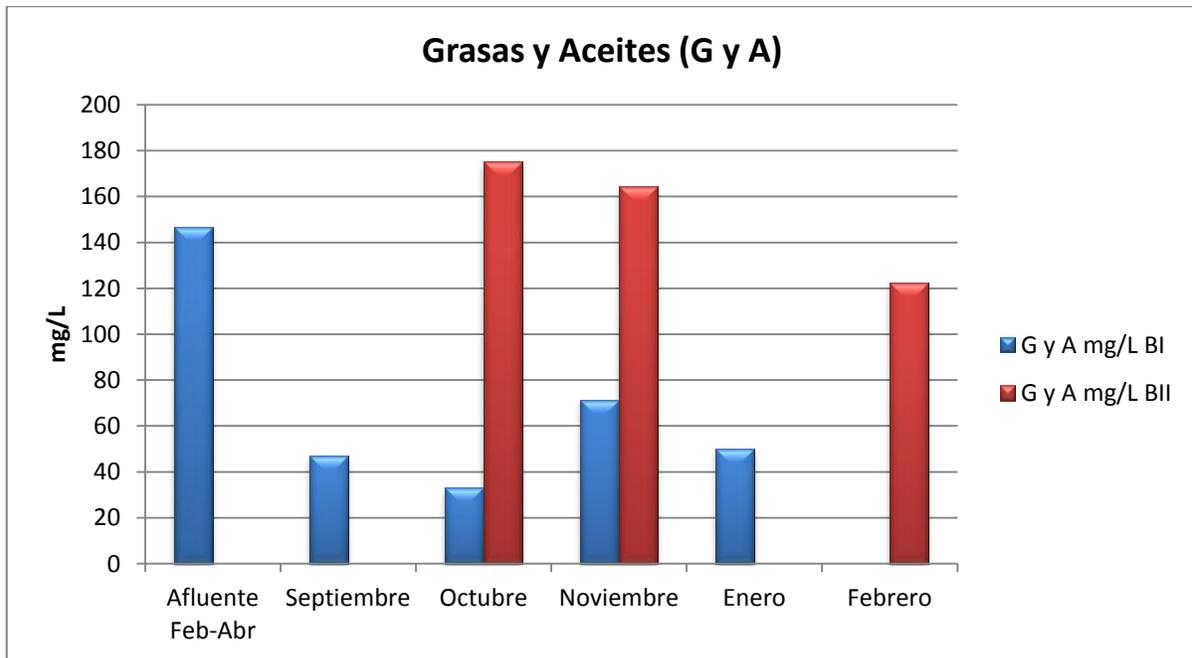
Grasas y aceites.

La presencia de grasas y aceites en el agua residual cruda y los subproductos obtenidos a partir del proceso de anaerobiosis son de suma importancia, ya que como subproductos se encuentran el acetato y otros ácidos grasos de cadena corta, productos de la fermentación anaerobia, son captados y almacenados dentro de la célula, por los microorganismos, en forma de poli-βhidroxi-butilato (PHB).

Las grasas y aceites en el efluente registraron concentraciones de 146.75 mgL⁻¹, al cuarto mes de funcionamiento en el biodigestor I se alcanzaron concentraciones de 32.93 mgL⁻¹ y de 122.43 mgL⁻¹ en el biodigestor II (Gráficas 35 y 36).

Concentraciones suficientes para que el proceso de anaerobiosis promoviera la formación de subproductos como los ácidos grasos volátiles y con ello desencadenar el consumo de DQO y la consecuente producción de metano.

Gráfica 19.



Se registró una remoción de grasas y aceites, pasando de 146.75 mgL^{-1} a 32.93 mgL^{-1} al tercer mes de funcionamiento, alcanzando un remoción promedio del 70% en el primer sistema, teniendo un repunte en el mes de Noviembre el cual está asociado a la labores de limpieza y mantenimiento del sistema (Gráfica 19), para el segundo sistema, al primer mes de funcionamiento el valor es mayor al obtenido en la caracterización esto debido al aumento súbito de las cabezas de ganado con lo que la carga orgánica aumento en el sistema alcanzando porcentajes de remoción de alrededor del 10% (Gráfica 19), esta baja eficiencia está asociada al rebase de la capacidad de tratamiento del sistema, ya que al aumentar la carga orgánica, disminuyen la eficiencia de remoción, durante la revisión bibliográfica no se encontraron trabajos en los cuales se cuantificara la

remoción de grasas y aceites, de manera que el presente trabajo queda como un antecedente, para el tratamiento así como la remoción de grasas y aceites con este tipo de tecnología.

Costos de construcción

Este sistema de tratamiento de aguas residuales porcícolas para granjas pequeñas, ha sido concebido como un sistema restringido económicamente, por considerar que estas no cuentan con recursos financieros suficientes. Sin embargo, esta granja si cuenta con el recurso humano, por lo que parte del éxito del sistema se fundamenta en la operación, supervisión y mantenimiento del sistema.

El costo de construcción del sistema de contención fue de \$8,500.00, de los cuales \$6,000 son los costos de los materiales y el resto de mano de obra, los materiales necesarios para el establecimiento de un biodigestor representan un costo aproximado de \$1,250 pesos, en total el costo fue de \$9,750.00 para el establecimiento de un sistema de tratamiento. Estos costos se pueden abatir sustancialmente si solo se cava una zanja para contención del sistema.

En México la Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente, Ley Federal de Derechos, Ley de Aguas Nacionales y su reglamento y las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-002-ECOL-1996, reglamentan el vertimiento de residuos líquidos a cuerpos receptores o alcantarillados públicos. Sin embargo, el control de cargas contaminantes ha sido aplicado a la materia orgánica y sólidos, pero en menor medida a la eliminación de N y P presentes en las aguas residuales, lo que ha generado un deterioro progresivo de los cuerpos de agua y la posible pérdida de ecosistemas acuáticos importantes para el mantenimiento de la calidad del recurso y del ambiente.

8.2 Manual

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



CARRERA DE BIOLOGÍA



Biodigestores anaerobios, una alternativa para el tratamiento de aguas residuales derivadas de la porcicultura

Guía básica de diseño, construcción,
operación y mantenimiento

Neftalí Bonfil Castro y José Raziel Valencia Lira

2011

- 77 -

Índice

1. Presentación	79
2. Introducción	80
2.1. La digestión anaerobia	82
3. Conceptos en el diseño de un biodigestor	83
3.1. Temperatura y tiempo de retención	84
3.2. Estiércol disponible	84
3.3. Carga de mezcla diaria de entrada	86
3.4. Volumen total de biodigestor	87
3.4.1. Volumen líquido	87
3.4.2. Volumen gaseoso	87
3.5. Producción de biogás	87
3.6. Producción de fertilizante	88
3.6.1. Aplicaciones del fertilizante	89
4. Dimensionamiento de un biodigestor	89
4.1. Ancho de rollo y radio de la manga	89
4.2. Volumen de una manga, sección eficaz y longitud	90
4.3. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor	91
4.4. Dimensiones de la zanja del biodigestor	92
4.4.1 Dimensiones y acabado	92
4.5. Equilibrio hidráulico	94
5. Esquema de metodología de diseño	96
6. Materiales necesarios	96
7. Selección del lugar	97
8. Construcción	98
8.1. Biodigestor	98
8.2. Salida de biogás	98
8.3. Tubos de entrada y salida	99
8.4. Amarre de la entrada y salida	99
8.5. Instalación del biodigestor	101
8.6. Introducción en la zanja	101
8.7. Niveles de salida y lodo	102
8.8. Primera carga de llenado	104
9. Mantenimiento diario y recomendaciones	104
10. Bibliografía	105

1. Presentación

Entre las actividades pecuarias que se desarrollan en México la porcicultura desempeña un papel preponderante, se ubica en el lugar 18 en el ámbito mundial y en segundo lugar en el latinoamericano. Ocupa el tercer puesto entre las actividades pecuarias del país, el 60% de esta producción corresponde a productores en pequeña escala, generando un volumen de aguas residuales de 18,336,688 m³/año, a su vez se estima que el 38% de las granjas descargan sus residuos en cuerpos receptores propiedad de la nación, sin ningún tratamiento lo que provoca un alto grado de contaminación (Almeida, 2005).

Las descargas de aguas residuales derivadas de las actividades pecuarias en general, son un problema grave ambientalmente hablando así como de salud, una de las principales fuentes de contaminación y generadoras de este tipo de descargas son aquellos lugares destinados a la crianza y engorda de ganado, como granjas y rancherías, este tipo de descarga son de composición variada pero tienen en común una alta carga de materia orgánica, nitrógeno y bacterias coliformes, además se encuentran estrechamente relacionadas con la proliferación de fauna nociva como moscas y roedores, los cuales propagan una gran cantidad de enfermedades, siendo estos lugares de descarga focos de infección.

Los biodigestores de polietileno ofrecen una alternativa viable, de bajo costo, fácil operación y mantenimiento, como una fase del tratamiento de las descargas derivadas de la porcicultura, además ofrece la oportunidad de remover una alta cantidad de materia orgánica además este tipo de tecnología trae consigo beneficios adicionales, como son la producción de biogás y bioabono. Así mismo remueven cantidades importantes de materia orgánica, disminuyen los malos olores y abaten la proliferación de fauna nociva.

Debido a su bajo costo de construcción, fácil operación y mantenimiento, es una alternativa viable para disminuir el vertimiento directo de aguas sin tratamiento a barrancas, ríos, lagos, lagunas, etc.

Los procesos involucrados en la digestión anaerobia son muy diversos pero cada uno de ellos juega un papel importante en la remoción de contaminantes de la descarga. Esta tecnología se puede ser utilizada por productores en pequeña escala hasta los de gran escala. Esta guía servirá de apoyo a los productores interesados en desarrollarla y podrán implantarla de acuerdo a sus necesidades.

2. Introducción

Un biodigestor es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en biogás y fertilizante. El biogás puede ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar para alimentar un motor que genere electricidad. El fertilizante, llamado biol, inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se está tratando con la misma importancia, o mayor, que el biogás, ya que provee a las familias de un fertilizante natural que mejora sustancialmente el rendimiento de las cosechas.

Los biodigestores familiares de bajo costo han sido implementados en países del sureste asiático, en América Latina, Cuba, Colombia y Brasil. Estos modelos de biodigestores, construidos a partir de mangas de polietileno tubular, se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción. Por ello se consideran una “tecnología apropiada”.

Son tres los límites básicos de los biodigestores: a) la disponibilidad de agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el biodigestor, b) la cantidad de ganado, estiércol disponible o generado y c) la apropiación de la tecnología por parte de los productores (Martí, 2008).

Este modelo de biodigestor consiste en aprovechar el polietileno tubular (de color negro en este caso), para disponer de una cámara de varios metros cúbicos herméticamente cerrada. Este hermetismo es esencial para que se produzcan las reacciones biológicas anaerobias (Botero & Preston, 1987).

El film de polietileno tubular se amarra por sus extremos a tuberías de conducción, de unas 6 o 4" de diámetro (según las necesidades de cada productor) con tiras de ligas recicladas de cámaras de llantas de bicicleta.

Al ser flexible el polietileno tubular es necesario construir un sistema de contención que lo albergue, ya sea cavando una zanja o levantando dos paredes paralelas.

Una de las tuberías servirá como entrada de materia prima (mezcla de estiércol con agua). En el biodigestor se alcanza finalmente un equilibrio de nivel hidráulico, por el cual, desplaza un volumen igual, por la tubería del otro extremo, proporcionalmente al volumen de entrada.

Con este sistema, calculando convenientemente la inclinación de dichas tuberías, se obtiene un tanque hermético. Debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la cámara hermética, las bacterias anaerobias contenidas en el propio estiércol comienzan a digerirlo.

El producto gaseoso llamado biogás, realmente tiene otros gases en su composición como son el dióxido de carbono (CO_2) (20-40%), nitrógeno molecular (N_2) (2-3%) y ácido sulfhídrico (H_2S) (0,5-2%), siendo el metano (CH_4) el más abundante con un 60-80% (Martí, 2008).

Biodigestión

Es la fermentación realizada por bacterias anaeróbicas sobre la materia orgánica, componente de un 80% de las excretas y posee las ventajas de:

- Proporcionar combustible (biogás) para suplir las principales necesidades energéticas rurales.
- Reducir la contaminación ambiental al convertir las excretas, que hacen proliferar microorganismos patógenos, larvas e insectos, en residuos útiles.
- Producir abono orgánico (bioabono), con un contenido mineral similar al de las excretas frescas e igualmente útil para los suelos, los cultivos.
- Mediante la digestión por bacterias anaeróbicas se destruyen microorganismos, huevos de parásitos y semillas de malezas contenidos en las excretas frescas, quedando el fertilizante residual libre de tales gérmenes y plantas indeseables (Martí, 2008).

2.1. La digestión anaerobia

El estiércol fresco contiene bacterias que continúan digiriéndolo y producen metano, dióxido de carbono y otros gases. Si esta digestión se hace en ausencia de aire (digestión anaerobia) se produce biogás, que es uno de los intereses de un biodigestor. Realmente hay una producción en cadena de diferentes tipos de bacterias. Unas inicialmente producen una hidrólisis del estiércol generando ácidos orgánicos. Otro tipo de bacterias digieren estos ácidos orgánicos a través de una deshidrogenación y acetogénesis dando como resultado ácido acético e hidrógeno. Y finalmente otras bacterias, llamadas metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, que es el gas más importante del biogás y el que permite la combustión (Martí, 2008).

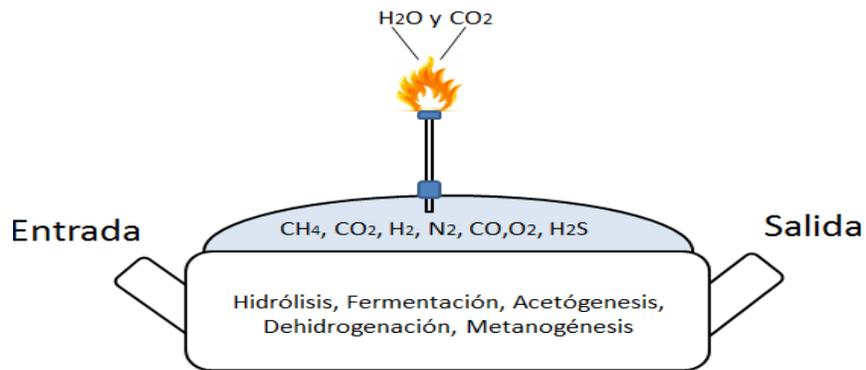


Figura 1. Procesos biológicos ocurridos dentro de un biodigestor

Fuente: Elaboración propia

3. Conceptos en el diseño de un biodigestor

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. Este parámetro marcará la actividad de las bacterias que digieren el estiércol, y cuanto menor temperatura, menor actividad tendrán éstas, y por tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor.

La carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día; la temperatura junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor.

Esta tecnología es adaptable a muchas situaciones, y su diseño puede considerar diferentes criterios entre los más importantes se encuentran:

- Necesidad de combustible
- Necesidades medioambientales (cuando se desea tratar todo el estiércol generado)
- Fertilizante natural
- Límite de estiércol

Fuente: Martí, 2008

3.1. Temperatura y tiempo de retención

Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima; tienen su mayor rendimiento a 70°C, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural, la actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción se depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias ya no producen biogás, porque su metabolismo se hace muy lento.

Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor.

Tabla 1. Tiempo de retención

Región característica	Temperatura (C°)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Fuente: Martí, 2008

3.2. Estiércol disponible

De acuerdo con un estudio realizado por Reid en 1970, la obtención de una tonelada de cerdo en canal requiere 6.36 toneladas de alimento, la tonelada de carne de pollo 4.81 toneladas y la de huevo 4.04. Si esto lo comparamos con 3.5

toneladas de concentrado proteico necesarias para producir una tonelada de carne de res en canal, o 0.4 toneladas para obtener una de leche, encontramos una relación mucho más estrecha entre alimento consumido y producción en los bovinos que en otras especies (Reid, 1970).

La disparidad de la cantidad de alimento necesario para la producción de carne es considerable, debido a la actividad que se lleva a cabo en el rumen de los bovinos, las poblaciones bacterianas juegan un papel importante en estos animales, participando de manera directa en la degradación de la materia orgánica como lo es la pastura, la cual de manera natural no es de ningún valor nutricional para ellos. Sin embargo, las poblaciones bacterianas asociadas al rumen de estos animales degradan esta materia a compuestos más simples de manera que sean asimilables para este tipo de animales y puedan ser utilizados en sus procesos metabólicos (Reid, 1970).

De ahí la importancia de agregar el inóculo de estiércol de res, debido a que en este, se encuentran las bacterias y los microorganismos necesarios para poder llevar a cabo los procesos de degradación de la materia orgánica dentro del biodigestor, así como la transformación de estos a biogás y la consecuente disminución de la DBO. Este es uno de los problemas más fuertes debido a la gran cantidad de alimento que necesitan consumir este tipo de animales para la producción de carne, dada su condición fisiológica, generando una gran cantidad de residuos derivados de la materia fecal y alimento desperdiciado, el cual posteriormente al ser mezclado durante la limpieza de las unidades de crianza y engorda generan una alta demanda de DBO_5 así como una elevada cantidad de aguas residuales.

Cada cerdo requiere de 0.12 a 0.22 L de agua, por kilogramo de peso vivo, lo que representa en una unidad de 100 hembras, un gasto entre 7,500 y 10,000 L de

agua diarios, equivalentes a 225,000 L de agua al mes. Aproximadamente el 82% del agua que ingresa a las granjas sale como agua residual acompañada de heces, orina, alimento desperdiciado y otros materiales que se arrastran a través de los drenajes (Bravo, *et al.*, 2008).

Tabla 2. Producción de heces y orina en cerdos por cien Kg de peso vivo

Estado fisiológico	Promedio(Kg)	Rango(Kg)
Hembra vacía	4.61	3.3-6.4
Hembra gestante	3.0	6.0-8.9
Hembra lactante	7.72	6.0-8.9
Macho reproductor	2.81	2.0-3.3
Lechón lactante	8.02	6.8-10.9
Levante	6.26	5.9-6.6
Finalización	6.26	5.7-6.5

Fuente: ACP, *et al.*, 1997

Lo anterior origina que la carga orgánica en el agua residual de una granja porcina sea mayor que la de residuos municipales, con una cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) de 23,013 mg L⁻¹ y una DBO₅ de 7,238 mg L⁻¹, parámetros que se encuentran muy por arriba de la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996 (Taiganides, *et al.*, 1996).

3.3. Carga de mezcla diaria de entrada

Diariamente hay que cargar el biodigestor con estiércol mezclado con agua. A esto se le llama mezcla de carga diaria (estiércol más agua). En biodigestores tubulares conviene diluir mucho más el estiércol para que no se formen 'natas' en la superficie. Además, una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor realmente sea de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida. Los biodigestores tubulares que fueron cargados con más estiércol que agua, tienen que ser desatascados a los pocos meses, por acumularse exceso de materia sólida en su interior (Martí, 2008).

3.4. Volumen total de biodigestor

El volumen total del biodigestor, ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida y del 25% restante a la fase gaseosa, el volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido (Martí, 2008).

3.4.1. Volumen líquido

Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias, es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado (según la temperatura del lugar). Ya que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen líquido será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria. De esta manera, si imaginamos el biodigestor vacío inicialmente y comenzamos a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se haya considerado en llenarse. Y así, “tiempo de retención + 1 día”, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día ya digerida. El volumen líquido de un biodigestor será el resultado de multiplicar la mezcla diaria de carga por el tiempo de retención (Martí, 2008).

3.4.2. Volumen gaseoso

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia se va a producir biogás y éste se acumulará en la parte superior. Al ser el biodigestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y darle forma al biodigestor, el volumen gaseoso equivale a un tercio del volumen líquido (Martí, 2008).

3.5. Producción de biogás

La mezcla de estiércol con agua en el interior del biodigestor, en ausencia de aire, producirá biogás. Esta producción no es constante, y es un proceso que dura más o menos el tiempo de retención estimado según la temperatura de trabajo. De esta

forma, un Kg de estiércol irá produciendo biogás de forma paulatina a lo largo del tiempo de retención al que esté sometido, produciendo el estiércol de puerco 51 litros de biogás por cada kilogramo de estiércol seco (Martí, 2008).

Tabla 3. Equivalencias energéticas del biogás

1000 litros (1 m ³) de Biogás equivalen a:	
Madera	1.3 kg
Alcohol	1.1 litros
Gasolina	0.75 litros
Gas-oil	0.65 litros
Gas natural	0.76 m ³
Carbón	0.7 kg
Electricidad	2.2 Kw/h

Fuente: Martí, 2008

3.6. Producción de fertilizante

La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás; quedará un líquido ya digerido, que ha producido todo el biogás posible, y que se convierte en un excelente fertilizante, al que se le suele llamar de forma general biol. Algunos autores diferencian entre su parte más líquida y su parte sólida, llamando a la primera biol y a la segunda biosol.

El fertilizante producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio cercano al 1% y aproximadamente un 85% de materia orgánica con un PH de 7.5. Para producir un mejor fertilizante es necesario aumentar los tiempos de retención, de manera que el lodo se descomponga más, sea de mayor calidad y más fácil de asimilar por las plantas (Martí, 2008).

Tabla 4. Tiempo de retención según la temperatura

Región característica	Temperatura (C°)	Tiempo de retención (Días)
Trópico	30	25
Valle	20	37
Altiplano	10	65

Fuente: Martí, 2008

3.6.1. Aplicaciones del fertilizante

Existen diferentes experiencias en el uso del biol producido, aquí se presentarán tres de ellas, explicadas de acuerdo a los tiempos de los cultivos.

- Inicialmente, cuando el terreno se ara, se puede usar el fertilizante recién salido del biodigestor para regar cada surco.
- El día antes de sembrar, se pueden introducir las semillas o granos en una mezcla de 1 a 1 de fertilizante con agua por un tiempo de 4 o 5 horas.
- Una vez en crecimiento la planta, se puede filtrar el fertilizante y fumigar (uso como fertilizante foliar) las plantas con una mezcla de una parte de fertilizante y 4 de agua. Funciona muy bien fumigar tras una helada, así como cuando comienza el fruto a aparecer, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta.

4. Dimensionamiento de un biodigestor

Conociendo el volumen total de un biodigestor se deberá determinar las dimensiones del mismo.

Las primeras dimensiones a determinar son la longitud y radio del biodigestor tubular.

4.1. Ancho de rollo y radio de la manga

El polietileno tubular se vende en rollos de 50 metros, con un ancho de rollo que varía normalmente entre 1, 1.25, 1.50, 1.75 y 2 metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico. Normalmente este

plástico se usa para carpas solares, y de igual manera se vende en su forma tubular. Para su uso se corta en uno de sus pliegues y se abre la manga de plástico para convertirla en una sábana del doble de ancho que el ancho de rollo. Para la construcción de biodigestores tubulares, es la forma del plástico, la que permite hacer una cámara hermética si es que amarramos ambos extremos de la manga. El ancho de rollo determina el diámetro y radio del biodigestor. Según el ancho de los rollos más comunes en el mercado encontramos:

Tabla 5. Parámetros según el ancho de rollo

Ancho de rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	1	2
1.25	2.5	1.25	2.5
1.50	3	1.50	3.0
1.75	3.5	1.75	3.5
2	4.5	2	4

Fuente: Tomado y modificado, Martí, 2008.

4.2. Volumen de una manga, sección eficaz y longitud

El biodigestor es una manga de plástico amarrada por ambos extremos a una entrada y una salida. El volumen total de la manga equivale al volumen de un cilindro (en metros cúbicos) que se calcula multiplicando $(\pi \times r^2) \times L$, siendo $\pi=3.1416$, “r” el radio del tubo (en metros) y “L” longitud del biodigestor (en metros). Lo normal es primero obtener los resultados de $\pi \times r^2$ (sección eficaz) para cada uno de los anchos de rollos disponibles, para luego con estos valores, estimar la longitud necesaria para alcanzar el volumen total deseado.

$$V \text{ cilindro} = (\pi \times r^2) \times L$$

$$\text{Sección eficaz cilindro} = \pi \times r^2$$

$$\pi = 3.1416$$

$$r = \text{radio del tubo}$$

$$L = \text{longitud del biodigestor}$$

Tabla 6. Sección eficaz según el ancho de rollo

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz ($\pi \times r^2$) (m ²)
1	3.14
1.25	4.90
1.50	7.06
1.75	9.62
2	12.56

Fuente: Tomado y modificado, Martí, 2008.

Conociendo el volumen total (Vt) del biodigestor y las secciones eficaces de los plásticos disponibles (según su ancho de rollo), es fácil determinar la longitud necesaria. Si el volumen del biodigestor es $(\pi \times r^2) \times L$, y conocemos todos los parámetros excepto la longitud, despejando de la anterior fórmula se obtiene:

$L = Vt / (\pi \times r^2)$, de esta manera se genera un cuadro en el que se registran los resultados de la longitud para cada ancho de rollo.

$$L = Vt / (\pi \times r^2)$$

Tabla 7. Longitud del biodigestor según el ancho de rollo

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz ($\pi \times r^2$) (m ²)	Longitud del biodigestor (m)
1	3.14	Vt/3.14
1.25	4.90	Vt/4.90
1.50	7.06	Vt/7.06
1.75	9.62	Vt/9.62
2	12.56	Vt/12.56

Fuente: Tomado y modificado, Martí, 2008.

4.3. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

Según lo anterior, se tendrán diferentes posibilidades de longitudes y anchos de rollo para alcanzar el volumen total deseado. Los anchos de rollo más grandes exigirán menor longitud para alcanzar el volumen deseado. No conviene biodigestores demasiado cortos ni largos y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7.

Esto significa que dividiendo la longitud estimada entre el diámetro de la manga, habrá que seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a una relación de 7. Esta relación es flexible en un rango de 5-10, siendo la mejor 7.

$$\frac{L}{d} = \text{entre 5 a 10 (óptimo de 7)}$$

Tabla 8. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

Ancho de rollo (m)	Longitud del biodigestor (m)	Diámetro del biodigestor	L/d (óptimo de 7 en un rango de 5-10)
1	$Vt/3.14$	2	L/d
1.25	$Vt/4.90$	2.50	L/d
1.50	$Vt/7.06$	3.0	L/d
1.75	$Vt/9.62$	3.50	L/d
2	$Vt/12.56$	4	L/d

Fuente: Tomado y modificado, Martí, 2008.

De esta manera, calculando la sección eficaz para cada ancho de rollo disponible en el mercado, estimando a partir de esta y del volumen deseado las diferentes longitudes requeridas, se elige el mejor, dimensionado según el criterio de una relación entre la longitud y el diámetro de 7.

4.4. Dimensiones de la zanja del biodigestor

El diseño final del biodigestor requiere conocer las dimensiones de la zanja donde se acomodará el plástico tubular. La longitud, profundidad y ancho de la zanja, queda determinada por la longitud, así como del ancho de rollo empleado en la construcción del biodigestor. De forma general, se puede emplear las siguientes dimensiones para la zanja:

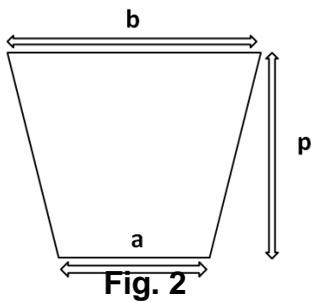


Tabla. 9

Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)					
AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a(m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b(m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p(m)	1	0.9	0.8	0.7	0.6

Fuente: Martí, 2008.

Hay que considerar que al alojar el biodigestor en la zanja, las paredes de ésta sustentarán toda la presión del volumen líquido del biodigestor. La cúpula de biogás estará en la parte superior y ocupará un 25% del volumen total.

Si se construye una zanja sin considerar el ancho empleado puede suceder que la cúpula de biogás sea demasiado pequeña o incluso grande. En caso de que la cúpula ocupe más de un 25% del volumen, se estará restando volumen a la fase líquida y por tanto reduciendo el tiempo de retención (Martí, 2008).

4.4.1 Dimensiones y acabado

Una vez ubicado el lugar donde estará el biodigestor se cavará una zanja. Las dimensiones de la zanja dependen del ancho de rollo que se use para el biodigestor.

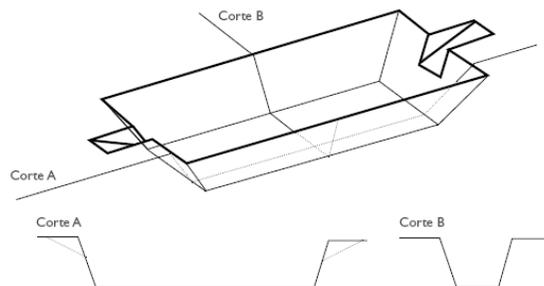


Figura 3. Forma de la zanja, con sus dos cortes. En ellos se ve que la zanja tiene las paredes inclinadas (chaflán). También se puede ver los huecos para la entrada y la salida (Martí, 2008).

Conviene que las paredes de la zanja tengan forma de 'chaflán' (las paredes inclinadas en forma de "v", como indica la figura 2), evitando de esta manera que se desmoronen las paredes. Además, se aproxima más a la forma tubular del biodigestor. Las cuatro paredes, las dos laterales, la de la entrada y la de salida, han de tener esta forma de "chaflán".

La zanja no ha de tener desnivel, aunque se permite hasta un 5%, esto para la autodepuración del sistema. En casos en que el terreno sea duro por encontrar piedra o roca, se puede tomar como alternativa levantar unos pequeños paredones en vez de seguir cavando. Para la entrada y salida, se deberá cavar un canal inclinado, con un ángulo de 45° en sus paredes correspondientes.

Una vez construida la zanja, se quitarán las piedras y raíces que asomen a ésta, para evitar que puedan dañar al biodigestor. Tras esto, se forran los laterales de la zanja, las cuatro paredes, se pulen finamente con cemento, a manera que no queden protuberancias que puedan dañar el biodigestor.

El fondo de la zanja, aun al descubierto se ha de forrar o rellenar, con arena fina o con paja. Esto es para que el biodigestor se acomode bien cuando se esté realizando la primera carga. En algún caso se ha rellenado el fondo con estiércol, de forma que al poner luego el biodigestor sobre éste, fermentará aumentando la temperatura y ayudando a que se inicie el proceso más rápidamente. Habiendo cavado la zanja con las dimensiones acordes al ancho de rollo que se va a usar, quitando las piedras y raíces, forrando las paredes, y cubriendo el suelo, el biodigestor estará listo para ser instalado (Martí, 2008).

4.5. Equilibrio hidráulico

El biodigestor tubular es de flujo continuo y por tanto no es necesario vaciarlo normalmente a lo largo de su vida útil, mientras se respeten las tasas de carga

orgánica. Se produce un equilibrio hidráulico por lo que cada día al realizar la mezcla de carga por la entrada, desplazará el lodo interior y rebosará por el otro extremo, que es la salida, la misma cantidad pero del material ya digerido, esto para descargas con bajas concentraciones de sólidos, en este caso al tratarse de aguas con una elevada cantidad de materia orgánica es necesario realizar tareas de mantenimiento y vaciado del sistema regularmente (aprox. cada 3 meses), esto debido a que el material digerido se deposita en el fondo del sistema y puede ser utilizado como un mejorador del suelo, o bien prolongar los tiempos de retención para que de esta manera el estiércol pueda ser transformado y digerido por acción de los microorganismos y disminuya considerablemente la concentración de sólidos en el sistema.

Por tanto, el rebose del lodo interior, es definido por la altura de la boca del tubo de salida. Este nivel corresponderá, por tanto con la profundidad de la zanja, para que de esta manera, el lodo en el interior del biodigestor, alcance dicha altura, y el volumen del líquido estimado corresponda con la realidad. Si la boca de salida está por debajo de la profundidad estimada, estaremos reduciendo la altura del lodo en el interior (y por tanto reduciendo el volumen líquido y el tiempo de retención). Y si por el contrario la boca de salida se encuentra por encima de la profundidad estimada, estaremos aumentando el volumen líquido, e impidiendola formación de la cúpula superior que acumula gas (Martí, 2008).

5. Esquema metodológico de diseño

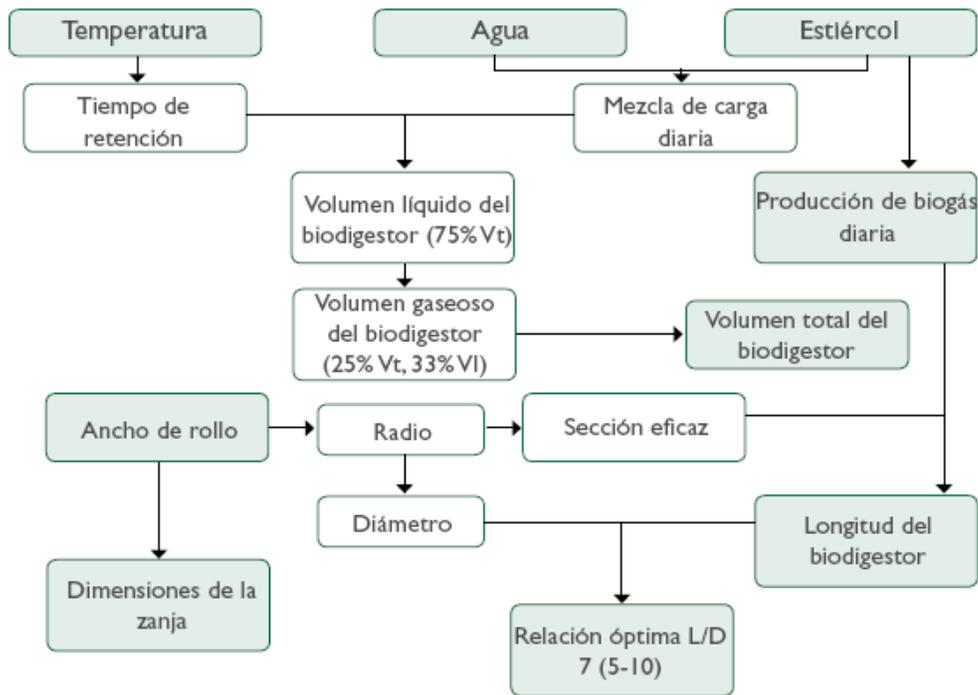


Figura 4. Metodología de Diseño

Fuente: Martí, 2008.

6. Materiales necesarios

Todos los materiales necesarios para la construcción de un biodigestor están disponibles en los mercados y tlapalerías locales. El material más particular es el polietileno tubular, ya que normalmente se deberá pedirlo de 600 micrones de grosor. Este material se vende por unos anchos de rollo fijos, y por tanto habrá que pedir el ancho de rollo que convenga para cada tipo de biodigestor.

Tabla 10. Lista de materiales

Material	Unidades
Macho 1 ½"	1
Hembra 1 ½"	1
Empaques	2
Tubo de PVC de 4" o 6"	2 m
Tubo de PCV de 1 ½"	Necesario
Cámaras de bicicleta	6 - 8
Válvula de salida hermética 1 ½"	1
Silicón industrial resistente a altas temperaturas	1
Polietileno tubular (500 micrones)	Necesario
Cinta gris industrial	1

Tomado y modificado de: Martí, 2008.

7. Selección del lugar

Es importante considerar que la zanja del biodigestor no debe interrumpir el camino de animales o personas. La zanja, en lugares de altiplano (clima frío), deberá estar orientada a lo largo de este a oeste, se deberán cuidar las sombras que los árboles del entorno que se pudieran producir sobre el sistema.

En valle la orientación no es tan importante, ya que la radiación solar no juega un papel importante en el calentamiento directo del biodigestor, deberá estar en zonas soleadas, nunca de sombra, ya que la radiación solar ayudará a calentar el terreno donde esté ubicada la zanja. El biodigestor, como ya se ha dicho deberá estar protegido por el sol por una semisombra o techumbre.

En zonas tropicales el ambiente caluroso es suficiente para hacer funcionar correctamente el biodigestor y por tanto su ubicación no tiene por qué estar orientada y debe de priorizar la facilidad de la construcción.

El biodigestor no debe tener ramas de árboles sobre él, ya que con el viento estas pueden caer y dañarlo.

8. Construcción

Listos los materiales y herramientas se comienza la construcción del biodigestor. Es importante realizar esta parte sobre una superficie libre de piedras u objetos que pudieran dañar al plástico.

Se puede hacer en un lugar con hierba densa, revisando antes que no haya piedras sobresalientes, o sobre el suelo de una habitación grande, habiendo barrido anteriormente, o llevando unas lonas gruesas para echar sobre el suelo y colocar el material de polietileno en cualquier lugar y trabajar sobre ellas.

8.1. Biodigestor

Lo primero es cortar el plástico tubular del tamaño deseado. Recordar en este punto que se ha de cortar un metro más de plástico que el tamaño final del biodigestor, ya que el excedente se usará en amarrar 50 cm a la tubería de entrada y 50 cm para la salida. (Figura 5)



Figura 5. Extensión del biodigestor

8.2. Salida de biogás

Cuando recién se tenga la manga de plástico hay que hacer la salida para el biogás usando el macho y la hembra de PVC. Además se deberá conseguir dos empaques de plástico conviene que el tamaño de estos empaques sea del tamaño adecuado a las piezas, para garantizar un sello hermético. Es conveniente hacer los orificios a la mitad del biodigestor para que de esta manera sea más fácil drenar el gas (Tomado y modificado: Martí, 2008). (Figura 6)



Figura 6. Sellado de la válvula de salida.

8.3. Tubos de entrada y salida

Una vez hecha la salida de biogás, es momento de cerrar los extremos de la manga de plástico amarrándolos a las tuberías de entrada y salida. Ambos tanto entrada como salida son idénticos. Lo primero es limar el borde del tubo que va a estar en el interior del biodigestor. Esto es para que durante el amarre y la manipulación, el filo del tubo normalmente áspero, no dañe al plástico.

8.4. Amarre de la entrada y salida

Listos los tubos de PCV de 4" o 6" y 1.5 m de largo ya lijados, se colocan en los extremos del biodigestor, introduciéndolos dentro de la manga unos 30 cm, y por tanto dejando a la vista el resto. Ahora hay que acomodar el plástico para poderlo amarrar a los tubos. Para ellos se sujeta un lateral de plástico y se le van haciendo pliegues en forma de acordeón. Así se va recogiendo el plástico hasta ponerlo contra el tubo. Se procede de igual manera con el otro lateral. Conviene que los pliegues no generen arrugas entre unos y otros y que los pliegues sean largos abriéndose a lo largo del resto de la manga de plástico. (Figura 7)



Figura 7. Dobleces para el amarre de entrada y salida

Hecho esto en ambos lados del tubo, se miden 50 cm a partir del origen del plástico, y a partir de ese punto se empieza a amarrar con la liga de bicicleta. Esto significa que dentro del biodigestor quedará el resto de la tubería sin amarrar. Así, cuando se va a comenzar a amarrar, quedarán 20 cm de tubo a la vista, 50 cm que serán amarrados sobre el plástico y 30 cm en el interior libres.

Para amarrar la liga, cada vuelta tiene que solaparse por encima con la anterior, de esta manera se va ascendiendo por el tubo poco a poco, este amarre tiene que ser fuerte y en caso de que se rompa la liga no hace falta empezar de nuevo ya que se puede continuar sobre la parte ya amarrada. Es muy importante que quede tensa la liga y solapada sobre la anterior vuelta. Una vez que se ha amarrado los 50 cm de plástico se continúa amarrando sobre la tubería 10 cm más. Este proceso se hace tanto para la entrada como para la salida del biodigestor (Tomado y modificado: Martí, 2008). (Figura 8)



Figura 8. Amarre de los extremos con la cámara de llanta

Teniendo ya construido el biodigestor, hecha la salida de biogás, limados los tubos tanto de entrada como de salida y amarrados los extremos de la manga a éstos, el biodigestor está listo para ser instalado.

8.5. Instalación del biodigestor

La instalación de biodigestor se realiza al menos entre dos personas, si son más personas mejor. Lo más importante es proteger el biodigestor de rozaduras con el suelo o cualquier otro objeto en el traslado. En esto hay que tener un serio cuidado, pues un hueco en el plástico hará que este ya no sirva. (Figura 10)

8.6. Introducción en la zanja

El biodigestor ya construido hay que meterlo en la zanja preparada, con sus paredes forradas, pulidas y el suelo relleno. Para ello lo mejor es desplegar el biodigestor y entre varias personas transportarlo hasta la zanja formando de manera que al momento de transportarlo no valla a sufrir rasgadas. Cada persona tiene que preocuparse de que no roce con nada el plástico, para ello lo mejor es voltear los bordes laterales del biodigestor doblado hacia el centro.

Una vez ubicado dentro de la zanja, conviene revisar que la parte inferior no tenga arrugas, estirando de ambos extremos del biodigestor y si hace falta alguna de las personas deberá ubicarse dentro de la zanja para verificar que el polietileno este perfectamente colocado. De existir arrugas, éstas luego no podrán ser quitadas, ya que el peso del agua y el lodo en el interior del biodigestor lo impedirán (Martí, 2008). (Figura 10)



Figura 10. Introducción a la zanja

8.7. Niveles de salida y lodo

Asentado ya el biodigestor toca calcular los niveles de la tubería de salida y entrada. La profundidad de zanja se corresponde con el nivel máximo que alcanzará el lodo dentro del biodigestor. Para que este sea el nivel, es necesario que la salida; la boca externa del tubo esté a ese nivel. Para ello se usa una manguera transparente para calcular el nivel (Tomado y Modificado de Martí, 2008). (Figura 11)

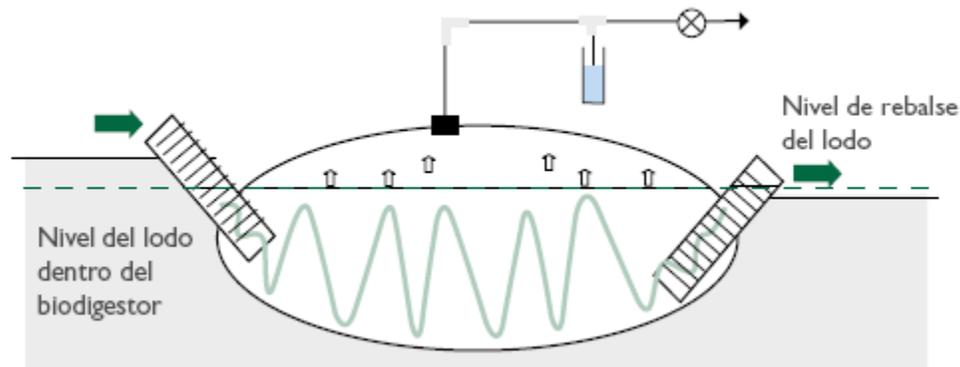


Figura 11. Esquema básico de un biodigestor

Fuente: Martí, 2008.

Es muy importante colocar los tubos de entrada y salida para que el nivel del lodo sea óptimo. El nivel del lodo, lo da la boca de salida, y tiene que ser equivalente a la profundidad de la zanja. El tubo de entrada se coloca de tal manera que la parte media de la zona amarrada coincida con el nivel de salida (Martí, 2008).

Una vez que la parte inferior de la boca externa del tubo de salida está al nivel para que el biodigestor se llene hasta una altura igual a la profundidad de la zanja, se ajustará el tubo de entrada. En este caso el tubo de entrada estará más elevado y el nivel del lodo (que corresponde con el nivel de la salida) debe quedar en medio del amarre de la tubería de entrada. Determinados los niveles, conviene amarrar los tubos para que queden fijos.

Cuando se empieza a cargar el biodigestor, éste va a jalar de los tubos hacia dentro de la zanja y por ello es necesario sujetarlo, una vez hecho esto, es muy recomendable cubrir el amarre de los tubos de entrada y salida con un saco o costal viejo para que el sol no termine quemando las cámaras de bicicleta (Tomado y modificado de: Martí, 2008).

8.8. Primera carga de llenado

Una vez instalado el biodigestor se procede a realizar la primera carga de estiércol y agua. En esta carga lo más importante es echar buena cantidad de estiércol fresco y llenar hasta que las bocas interiores de los tubos de entrada y salida queden tapadas por el lodo. En cuanto se logre tapar la parte interior de los tubos, el aire ya no tendrá acceso al interior del biodigestor, esencial para el proceso de anaerobiosis y para que se produzca metano.

La primera carga es importante pues de ella depende que se comience antes o después a producir biogás, así como la ruta bioquímica para obtenerlo. De forma general conviene acumular estiércol fresco durante los siete días anteriores a la instalación, para que el día de la primera carga se tenga suficiente material.

9. Mantenimiento diario y recomendaciones

Instalado ya el biodigestor, se realiza una primera carga con estiércol y agua suficiente para tapar las bocas interiores al biodigestor de los tubos de entrada y salida. Tras esto, el segundo día ya será idéntico en mantenimiento a los días sucesivos en la vida del biodigestor. Hay que cuidar que ramas o herramientas no estén cerca del biodigestor y cuidar la semisombra, la techumbre o la carpa de invernadero que cubra el biodigestor para un buen mantenimiento. Si se puede hay que cercar el biodigestor para evitar que los animales lo dañen y evitar posible actos de vandalismo o juegos de niños.

A la salida, conviene hacer una poza, donde se vaya acumulando el fertilizante (Biol). De este pozo puede haber una salida directa que comunique con el canal de riego, si es posible, de los cultivos propios. Esta poza conviene taparla, para que el fertilizante no pierda sus propiedades. Puede taparse con una lámina de madera o metal, aunque también se puede echar paja encima, que flotará, y protegerá al fertilizante de la radiación solar (Martí, 2008).

10. Literatura citada

- Martí H. J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. 85 pp.
- Reid J. T. (1970). *Physiology of digestion and metabolism in the ruminant*. 1ra Ed. Oriel Press. pp. 8-9.
- Bravo A. A., Mejía R., Ramírez H. G., Herradora L. M. A., Pablos H. J. L. y Martínez G. R. (2008). Evaluación del suministro de agua residual tratada por separación-sedimentación-filtración en la salud de cerdos destetados. *Téc. Pec. Méx*, 46(3), 287-302.
- ACP, Cornare y Corantioquia (2002). Guía ambiental para el subsector porcícola. Guía. Medellín, Colombia. 102 pp.
- Taigánides E. P., Pérez E. R. y Girón S. E. (1996). Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Consejo Mexicano de Porcicultura, AC. México D.F.

9. Conclusiones

Con el presente trabajo se demuestran las ventajas que el biodigestor anaerobio tiene en el tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcícolas, particularmente los altos porcentajes de eliminación de materia orgánica y su estabilización, con lo que se demostró lo propuesto en la hipótesis, pudiendo diseñar y establecer este tipo de sistemas, en función de la caracterización de la descarga, para el posterior tratamiento de las aguas residuales derivadas de este giro.

La instalación del biodigestor (primera etapa) tuvo como objetivo primordial la separación de sólidos del agua residual y proporcionar al mismo tiempo un recipiente que permitiera regular las diferentes operaciones de alimentación y estabilización, tanto del lodo como del efluente líquido. Condición que la acondicionará para verterla a un humedal construido en una segunda etapa.

Se obtuvo una remoción de DQO del 72% y de DBO_5 de 96%. Sin embargo, en el agua residual quedó un remanente que contiene compuestos nitrogenados y de fósforo que no son removidos de forma significativa por la digestión anaerobia, por lo que requieren de otro tratamiento para su transformación, o bien su reutilización en donde no represente un problema, como pudiera ser el cultivo de peces.

En tres meses de funcionamiento del sistema, el 87% de los sólidos totales fue removido, el 44% correspondía a la fracción volátil y el 98% de los sólidos totales correspondía a la fracción disuelta, con esta transformación se promueve la producción de metano, alcanzándose esta fase a los 20 días de funcionamiento el biodigestor, proceso relacionado directamente con la disminución de DQO, la cual pudo ser comprobada mediante la ignición del gas contenido en el sistema.

La remoción de fósforo, en sus diferentes fracciones, presentó un bajo nivel de remoción, esta baja remoción, puede ser aumentada de manera significativa colocando después de este sistema una etapa de pulimento, una alternativa podría ser la construcción y tratamiento del efluente por medio de humedales construidos, como una etapa de pulimento.

El sistema alcanzó 95% de remoción de organismos coliformes, logrando una remoción significativa generando un impacto positivo a la salud pública en la zona.

El sistema permite la recuperación de los sólidos que al reutilizarlos como abono orgánico, permitirá la recuperación de la inversión efectuada, por medio del bioabono y biogás, así como el mejoramiento de los campos de cultivos aledaños a la zona.

Se determinaron los requerimientos de inversión, donde el costo del sistema fue de \$9,750.00, estos costos se pueden abatir sustancialmente, si sólo se cava una zanja para la contención del sistema, debido a que el mayor gasto lo representa la construcción de la canaleta de contención.

Los costos operativos de energía, de reactivos químicos, son nulos, mientras que los de mano de obra son de aproximadamente \$1,200.00 mensuales para el mantenimiento del sistema.

Los biodigestores tubulares representan una alternativa viable para el tratamiento de las descargas de aguas residuales derivadas de la porcicultura, debido a su bajo costo fácil operación y mantenimiento, por ello es necesario difundir esta tecnología, objetivo que se logró mediante la elaboración de una guía para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los biodigestores, para minimizar en la medida de lo posible el impacto al ambiente derivado de esta

actividad productiva y además de las obtención de un beneficio económico en pro de las comunidades interesadas en adoptar la tecnología.

El biodigestor permite el control de los desechos y por consecuencia el impacto ambiental de los residuos será positivo, el lodo producido en el biodigestor anaerobio requerirá de un análisis para saber si ha sido mineralizado y es apto para fertilizante.

Un área prometedora de esta investigación se relaciona con los procesos anaerobios, que en los últimos años se ha vislumbrado como una solución para muchos de los problemas con las aguas residuales.

10. Recomendaciones

- Colocar intercalado un filtro de virutas de hierro para desodorizar el biogás, en la válvula de salida.
- Desarrollar un sistema para la captura y almacenamiento del biogás, para poder obtener un beneficio extra.
- Cavar una zanja para la contención del sistema, para abatir los costos de construcción de manera significativa.
- Respetar los tiempos de retención y cargas orgánicas diarias al sistema para evitar que se colme rápidamente.
- Llevar a cabo la utilización del efluente tanto líquido como sólido, los cuales ofrecen una alternativa para la obtención de beneficios económicos adicionales, los cuales podrían ser utilizados en el caso del bioabono como mejorador del suelo y el efluente líquido como un sustrato rico en nutrimentos para fertilizar las parcelas o bien para ser utilizado en el cultivo de peces.

11. Bibliografía

- ACP, Cornare y Corantioquia (2002). Guía ambiental para el subsector porcícola. Guía. Medellín, Colombia. 102 pp.
- Arteaga M. (2010); Calidad de las aguas residuales de la cuenca Lerma-Chapala. Tesis de maestría. Campus Montecillo. Colegio de postgraduados. Texcoco Edo. de México, México, 157 pp.
- Botero B. M. y Preston T. R. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Manual. Cali, Colombia. 20 pp.
- Bravo A. A., Mejía R., Ramírez H. G., Herradora L. M. A., Pablos H. J. L. y Martínez G. R. (2008). Evaluación del suministro de agua residual tratada por separación-sedimentación-filtración en la salud de cerdos destetados. *Téc. Pec. Méx*, 46(3), 287-302.
- Brown N. (1987). Biogas systems in development. *Appro. Tech*, 14(3): 5-7.
- Chará J., Pedraza G. y Conde N. (1999). The productive water decontamination system: A tool for protecting water resources in the tropics. *Live. Res. for Rur. Develop*. 11 (1), 15-17.
- CNA (2005). Estadísticas del agua en México 2005; Saneamiento, calidad del agua y aspectos de salud. México, Compendio estadístico. México, D.F. 76 pp.
- CONAGUA (2003). Estadísticas del Agua en México 2003. Compendio Estadístico. México, D.F. 87 pp.
- CONAGUA (2009). Compendio Estadístico de Administración del Agua 2009, Compendio Estadístico. México, D.F. 67 pp.
- CONEVAL (2008). Informe de evaluación de la política de desarrollo social en México 2008. Informe, México, D.F. 117 pp.

- Correa M. A. y Sierra J. H. (2004). Remoción integrada de materia orgánica, fósforo y nitrógeno en un sistema de filtros (biofiltros) en serie anaerobio/anóxico/aerobio en condiciones dinámicas. *Inge.* 31, 5-22.
- Day D. 1987. Management swine wastes. *Asoc. de Méd. Vet. Espe. en Cerd.* Acapulco, Gro., México.
- Escalas C. A. (2006). Tecnologías y usos de las aguas residuales en México [En línea] http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_download&Itemid=&gid=344 05/02/2011.
- Fulford D. 1993. Gobar gas revisited. *Appro. Tech.* 20 (3), 25-27.
- Gerardi, M. (2003). *The Microbiology Of Anaerobic Digesters*. Ed. Wiley, John & Sons, Inc. New York, U.S.A. 188 pp.
- González N. A. (2009). Caracterización del municipio de Apaxtla, Guerrero, para su ordenamiento ecológico. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 112 pp.
- IDAE (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Manual. Madrid, España. 48 pp.
- IMTA (2009). Sistema de tratamiento anaerobio para la reducción de carga orgánica alta (industria porcícola) y acoplamiento con un sistema de pulimento para la reducción de nutrientes. Reporte. México D.F. 8 pp.
- INEGI (1999). Guerrero: Censos Económicos 1999/ Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Informe. México D.F. 88 pp.
- INEGI (1999). Superficie de la República Mexicana por Estados. Reporte. México D.F. 15 pp.
- INEGI (2000). Principales resultados por localidad del XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Informe. Guerrero, México D.F. 280 pp.
- INEGI (2000). Marco geoestadístico municipal 2000, Reporte, México, D.F. 30 pp.

- INEGI (2006). Núcleos agrarios: tabulados básicos por municipio: 1992 - 2006: Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares. Informe. México D.F. 173 pp.
- INEGI (2007). Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. Informe. México DF. 80 pp.
- INEGI (2009). *Anuario estadístico. Guerrero, 2009*. Ed. INEGI. México D.F. 376 pp.
- Kato L. M. (1995). *La producción porcícola en México: Contribución al desarrollo de una visión integral*. Ed. UAM. México D.F. 90 pp.
- Lettinga G. y van Haandel A., Johansson T., Kelly H., Reddy A., Williams R. (1993). *Anaerobic digestion for energy production and environmental protection. In: Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity*. Ed. Earthscan, Island Press. Washington, D.C., U.S.A. 996 pp.
- Madigan M. T., Martinko J. M., Parker J. (2003). *Brock Biology of Microorganisms*. 10^{ed}, Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River. 200 pp.
- Magaña P. A. (2002). Reactores híbridos para el tratamiento integral del agua residual porcícola [en línea]. <http://www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/simposio/4Aldo.pdf> 06/04/2011
- Marín J. S., Coto J. M. y Sánchez V. (2002). Gestión ambiental en granjas porcinas. Un estudio de caso en la microcuenca de la Quebrada Salitral, en Costa Rica [En línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/viii-052.pdf> 30/06/2011.
- Martí H. J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. 85 pp.
- Martí H. J. (2011). Biodigestores de bajo costo, para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. International Center of Numerical Methods in Engineering (CIMNE), España.

- McCaskey A.T. (1990). Microbiological and chemical pollution potential of swine waste. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdos. CINVESTAV. Guadalajara, Jal., México. pp 12-32.
- Méndez N. R., Castillo B. E., Vázquez B. E., Briceño P. O., Coronado P. V., Pat C. R. y Garrido V. P. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. Ingeniería. 13 (2), pp. 13-21
- Metcalf y Eddy (1996). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento; vertido y reutilización*. 3ra ed Mc Graw Hill. Tomo I. U.S.A. 345 pp.
- Miner J. R. (1999). Alternatives to minimize the environmental impact of large swine production units. J. Anim. Sci. 77, 440 - 444.
- Noyola A. (1997). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Memorias Foro Internacional. Comparación de dos tecnologías en Aguas residuales domésticas para municipalidades. Universidad Nacional de Medellín, Colombia: 40 pp
- Pacheco A. J., Sauri R., Cabrera A. S. (1997). Impacto de la Porcicultura en el Medio Ambiente. Ingeniería. 1 (3) pp 53-58.
- Pedraza G., Chará J., Conde N., Giraldo S. y Giraldo L. (2001). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino [En Línea] <http://www.lrrd.org/lrrd14/1/Pedr141.htm> 30/06/2011.
- Preston T. R., Leng R. A. (1989) Friendly development. Livestock Research for Rural Development, 1(1). pp 21-32.
- Reid J. T. (1970). *Physiology of digestion and metabolism in the ruminant*. 1ra Ed. Oriel Press. pp. 8-9.
- Rittmann B. E. y McCarty P. L. (2001). *Fundamentos de microbiología. En: Biotecnología del medio ambiente principios y aplicaciones*. Ed. McGraw Hill Madrid, España. pp 1-116.

- Rodríguez M. J., Martínez A. S., Garza G. Y. (2009). Desnitrificación, sulfato reducción y metanogénesis durante la biomineralización de aguas residuales de la industria farmacéutica; Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Departamento de Biotecnología, Coahuila, México.
- Romero R. J. (2008). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*; Ed: Escuela colombiana de ingeniería. Colombia. 257 pp.
- SAGARPA (2007). Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012. Reporte México D.F. 52 pp.
- Schlegel H. G., Zaborosch C. (1993). *General Microbiology*. 2° ed. Cambridge University Press, UK. 253 pp.
- SECOFI (1980) Norma Oficial Mexicana NMX-AA-3-1980. Aguas residuales. Muestreo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 25 de Marzo de 1980.
- SEMARNAT (1996) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 24 de Junio de 1996
- SEMARNAT (1996) Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. Diario Oficial de la Federación. 18 de Octubre de 1993.
- SGG (2008). Manual de participación social y organización comunitaria 2009-2012, Manual, Tlaxcala México. 23 pp.
- Smith P. H., Bordeaux F. M., Wilkie A., Yang J., Boone D., Mah R. A., Chynoweth D., Jerger D., Smith W. H, Frank J. R. y Abelson P. H. (1998). Microbial aspects of biogas production. En: *Methane from biomass: a systems approach.*, ed. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex

- Taigánides E. P., Pérez E. R. y Girón S. E. (1996). Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Consejo Mexicano de Porcicultura, AC. México D.F.
- TBW (2001). Anaerobic Treatment of Municipal Wastewater in UASB-reactors GmbH. Manual. Frankfurt Alemania. 10 pp.
- Van Haandel A. C. y Lettinga G. (1994). *Anaerobic sewage treatment*. Ed. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England. 345 pp.
- Veenstra S., Alaerts G. y Bilsma M. (1998). Technology selection for pollution control. Agua y sostenibilidad. . En: Memorias de la Conferencia Internacional Agua 98. CINARA-Universidad del Valle. Cali, Colombia Junio 1-5. 10 pp.
- Vesilind P. A. (2003). *Wastewater plant design., Water environmental federation*. Edit. IWA. Gran Bretaña. 200 pp.
- Victorica A. J. y Galván G. M. (2005). Tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales de granjas porcinas, primera etapa [En línea] http://proyectos.iingen.unam.mx/Proyectos_2005_2006/07/7.2.5.pdf 3/04/2011.
- Viñas M., García R., Rubio N. (1995). II Congreso AIDIS de Norteamérica y el Caribe, IV Congreso Nac. de la ACIS. Junio, C. Habana, Cuba.