



TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO Y APLICACIÓN DE BIODIGESTORES

AUTOR: JULIÁN FUENTES

44100

DIRECTOR DE TESIS: ING. FÉLIX T. JONAS

2011

A mi familia,

por todo el apoyo brindado.

RESUMEN

Los costos y la disponibilidad energética, junto con los problemas asociados a su generación y distribución, están impulsando a nuevas formas de encontrar un desarrollo sustentable. En la actividad ganadera este problema no es una excepción. Sumándose a estas limitaciones la necesidad de cumplir con requerimientos ambientales e higiénicos, así como de prever futuras reglamentaciones que contemplen estos aspectos, en otros países, principalmente aquellos pertenecientes a Europa y Estados Unidos, ya se ha implementado el uso frecuente de biodigestores anaeróbicos para el tratamiento de excrementos animales. De esta manera, se aborda el doble propósito de tanto brindar una fuente de energía como un sistema de tratamiento de residuos.

El objetivo de este proyecto es analizar el proceso de biodigestión anaeróbica para dar a conocer los distintos diseños de biodigestores existentes que mejor se adaptan a este tipo de industria y estudiar cuáles son las etapas y variables más influyentes en el proceso de biodigestión.

Finalmente se procede a buscar la mejor condición de diseño a la hora adaptar este sistema a las características regionales, para encontrar una opción que sea económicamente sustentable. Para tales fines, debido a la naturaleza específica del proceso de biodigestión, se limita el proyecto al análisis de tres posibles aplicaciones.

ABSTRACT

The cost and availability of energy, along with the problems associated with their generation and distribution, are driving new ways of finding sustainable development. This is no exception for livestock. Addressing these limitations and the need to comply with environmental and sanitary requirements and to anticipate future regulations that tackle these issues, many countries, mainly those from Europe and the United States, have already implemented the frequent use of anaerobic digesters for treatment of animal excrement. In this way, the dual purpose of both providing a source of energy and a waste treatment system is achieved.

The objective of this project is to analyze the anaerobic bio-digestion in order to show the existing digesters different designs that are best suited to this industry and explore the stages and the most influential variables in the process of bio-digestion.

Finally, the best design condition is obtained adapting the system to regional characteristics in order to find an option that is economically sustainable. For this purpose, due to the specific nature of the biogas production process, the project is limited to the analysis of three possible applications.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. BENEFICIOS	1
1.1.1. Fuente de energía in situ	1
1.1.2. Reducción de olores	1
1.1.3. Fertilizante	1
1.1.4. Reducción de patógenos	2
1.1.5. Impacto ambiental	2
2. QUÍMICA DEL PROCESO	3
2.1. ETAPAS EN LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA	3
2.1.1. Hidrólisis	4
2.1.2. Acidogénesis	4
2.1.3. Acetogénesis	5
2.1.4. Metanogénesis	5
2.2. VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO	5
2.2.1. Temperatura	5
2.2.2. pH.....	6
2.2.3. Mezclado	6
2.2.4. Control de amoníaco y sulfuro	7
2.2.5. Requerimientos de nutrientes	7
2.2.6. Tiempo de retención de sólidos	7
2.2.7. Tiempo de retención hidráulico.....	7
2.2.8. Sólidos Totales (TS)	8
2.2.9. Sólidos Volátiles (VS)	8
2.2.10. Inhibidores.....	8
3. INGENIERÍA DEL DEL PROCESO.....	9
3.1. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS	9
3.1.1. Residuos sin tratar	10
3.1.2. Residuos líquidos	10
3.1.3. Residuos lodosos	10
3.1.4. Residuos semisólidos	10
3.1.5. Residuos sólidos.....	10
3.2. BIODIGESTIÓN	11
3.2.1. Digestor de Laguna Cubierta (Covered Lagoon Digester).....	12
3.2.2. Digestor de Mezcla Completa (Complete MixDigester)	14
3.2.3. Digestor de Flujo (Plug FlowDigester)	15
3.2.4. Digestores de Película Fija (Fixed Film Digester)	16
3.3. PRODUCTOS DE LA BIODIGESTIÓN	16
3.3.1. Biogas.....	16

3.3.2. Fertilizante	19
4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	21
4.1. METODOLOGÍA	21
4.2. VARIABLES DE DISEÑO.....	22
4.3. PRINCIPALES GASTOS OPERATIVOS	26
4.3.1. Licuar efluentes	26
4.3.2. Calentar Efluentes	27
4.3.3. Comprimir Gas Metano.....	28
4.4. CONSIDERACIONES PREVIAS DE DISEÑO	29
4.4.1. Limitaciones tecnológicas.....	30
4.4.2. Concentraciones objetivo	30
4.4.3. Temperatura de funcionamiento del biodigestor	31
4.4.4. Tiempo de retención hidráulico.....	33
4.5. PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA INVERSIÓN	34
4.5.1. Tanque de Mezcla	34
4.5.2. Bomba de Agua.....	34
4.5.3. Tanque de Biodigestión	35
4.5.4. Intercambiador de Calor	35
4.5.5. Compresor.....	35
4.5.6. Tanque de Gas.....	35
4.5.7. Separador de sólidos.....	36
4.6. PRINCIPALES GANANCIAS	36
4.6.1. Generación de Gas Metano.....	36
4.6.2. Generación de Energía Eléctrica	36
4.6.3. Fertilizantes	37
4.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA SEGÚN ESCALA	39
4.7.1. Escala 1: Hogar	39
4.7.2. Escala 2: Tambos	41
4.7.3. Escala 3: Feedlots	43
5. IMPACTO AMBIENTAL.....	45
5.1. Energía alternativa	45
5.2. Emisiones de Carbono	45
5.3. Reducción de contaminantes	46
6. CONCLUSIÓN	47
7. ANEXOS	48
8. BIBLIOGRAFÍA	50

1. INTRODUCCIÓN

La biodigestión anaeróbica es un proceso mediante el cual residuos de origen orgánico son tratados con bacterias que trabajan sin la presencia de oxígeno para biodegradar los mismos. El principal producto obtenido a partir de este tratamiento es el biogás junto con un subproducto con altas propiedades orgánicas que sirven como fertilizante. Si bien un biodigestor se puede utilizar para tratar cualquier tipo de residuo mientras éste sea orgánico, cada diseño debe adaptarse al flujo de residuos, al tipo de residuos a tratar y a los productos que se quieren obtener resultado de la biodigestión.

1.1. **BENEFICIOS**

1.1.1. Fuente de energía in situ

El biogás producido tiene un alto contenido de metano que puede ser utilizado como fuente de energía mediante la combustión. En este aspecto, se pueden considerar diferentes opciones tales como fuente de calor o generación eléctrica. Debido a que la generación mediante la actividad anaeróbica es muy sensible a la composición de los residuos tratados, al tratarse con una población de animales conocida, las variables intervinientes en el proceso, descritas en el siguiente capítulo, pueden ser controladas y se puede lograr una constancia en todo el proceso, asegurando así una fuente constante y segura de biogás. Luego este biogás puede almacenarse para usarse como fuente de calor o como suministro para un generador eléctrico.

1.1.2. Reducción de olores

Los sistemas de biogás reducen la emanación de olores del material almacenado en hasta un 95%. Esto favorece tanto a las condiciones ambientales dentro del área de trabajo como en sectores aledaños.

1.1.3. Fertilizante

El efluente contiene un alto porcentaje de nitrógeno orgánico que puede ser utilizado como fertilizante. En este sentido, se puede considerar que el ahorro que

se obtiene mediante este proceso equivale al costo que se hubiera incurrido en comprar fertilizantes para obtener los mismos nutrientes que se adquieren por medio de la biodigestión.

1.1.4. Reducción de patógenos

Los biodigestores tienen la capacidad de aislar y reducir los patógenos contenidos en los residuos orgánicos. Para un cuidado del área productora agropecuaria, es fundamental contar con un sistema de reducción de patógenos; un biodigestor es una alternativa a considerar ya que cumple la doble función de aislar todo tipo de peligro biológico y generar energía.

1.1.5. Impacto ambiental

Mediante el proceso de biodigestión anaeróbica se logra un ahorro de combustibles fósiles y se reducen las emanaciones de carbono. El cálculo de estos dos beneficios se trata en mayor detalle más adelante.

2. QUÍMICA DEL PROCESO

2.1. ETAPAS EN LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

La biodigestión anaeróbica es un proceso mediante el cual microorganismos descomponen material biodegradable. Este proceso se puede dividir en cuatro estadios:

Hidrólisis

Acidogénesis

Acetogénesis

Metanogénesis

Para una mejor comprensión, se describen los subprocesos a continuación. Estos subprocesos no son en su totalidad en serie sino que en parte algunos se desarrollan en paralelo. En la figura 2.1.1-1 se esquematiza todo el proceso. La producción de metano se lleva a cabo al final del proceso y no ocurre si no se llevan a cabo las etapas anteriores. Las bacterias encargadas de producir el biogás son estrictamente anaeróbicas y, por ende, sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico. Este último punto es fundamental a la hora de considerar el diseño del biodigestor.

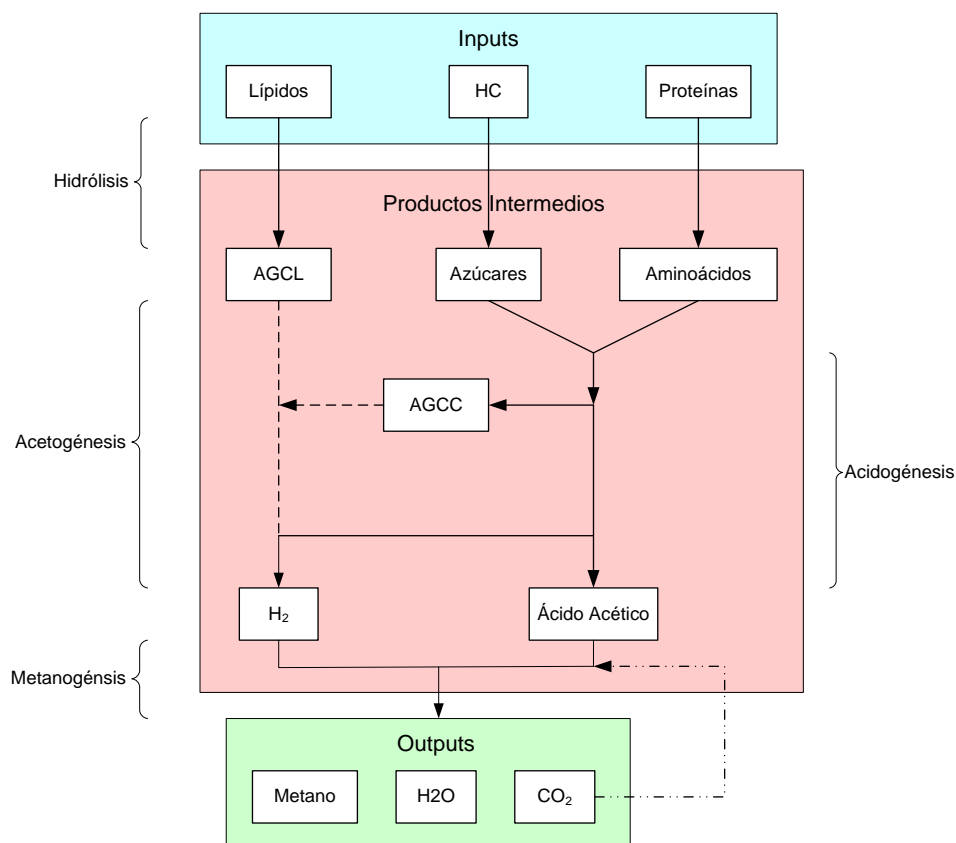


Figura 2.1.1-1: Esquema del proceso de biodigestión anaeróbica

2.1.1. Hidrólisis

En la mayoría de los casos, la biomasa está compuesta por moléculas de gran tamaño -lípidos, polisacáridos o hidratos de carbono (HC) y proteínas. Para poder aprovechar este material, es necesario que las partículas se dividan en otras de menor tamaño molecular. La hidrólisis consiste en la rotura de estas moléculas por la acción de la hidrólisis enzimática para formar ácidos grasos de cadena larga (AGCL), azúcares y aminoácidos.

2.1.2. Acidogénesis

Los aminoácidos y azúcares producidos en la hidrólisis de hidratos de carbono y proteínas se transforman en ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono y productos intermedios (principalmente ácidos grasos volátiles de cadena corta - AGCC)

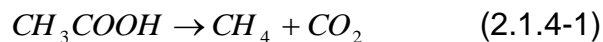
2.1.3. Acetogénesis

Los ácidos grasos de cadena larga - AGCL - producidos en la hidrólisis de los lípidos y los ácidos grasos de cadena corta - AGCC - producidos en la acidogénesis se transforman en ácido acético e hidrógeno

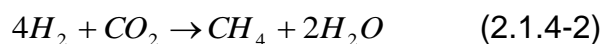
2.1.4. Metanogénesis

Esta es la última etapa de la digestión anaeróbica. Los metanógenos utilizan productos intermedios de los estados anteriores para convertirlos en metano, dióxido de carbono y agua.

Los productos de esta digestión ocurren por dos rutas diferentes. La ruta primaria del proceso es la fermentación de los productos de la etapa anterior. Los ácidos acéticos se convierten en metano y dióxido de carbono. Aproximadamente, el 70% del metano deriva de esta reacción. La reacción se describe en la fórmula 2.1.4-1.



A su vez, algunos metanógenos son capaces de utilizar el hidrógeno para convertir el dióxido de carbono en metano (proceso conocido como metanogénesishidrogenofílica), cuya reacción se puede esquematizar en la fórmula 2.1.4-2.



2.2. VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO

2.2.1. Temperatura

Como en la mayoría de las reacciones orgánicas, la temperatura afecta la velocidad de la misma. A mayor temperatura, mayor será la actividad biológica. Se han distinguido dos rangos de temperaturas considerados como óptimos para la producción del metano. Aunque el metano se puede producir a temperaturas menores de incluso 10°C, es preferible, para conseguir niveles de reacción adecuados, trabajar siempre a temperaturas mayores a los 20°C, lo que requiere

algún tipo de calefacción. Según estudios, la producción de metano se duplica con el aumento de 10°C dentro del rango mesofílico de temperaturas. [Drosteet *al.*, 1997]. Los tipos de bacterias que se generan durante el proceso de biodigestión según la temperatura se resumen en la tabla 2.2.1-1.

Bacterias	T°C	Detalle	Generación de Metano
Criofilica	<15	Enfriado	No recomendada
Criofilica	15-30	Temperatura ambiente	Regular
Mesofílica	30-50	Calefaccionado	Óptima
Termofílica	50-60	Calefaccionado	Óptima
	>60	Calefaccionado	No recomendada

Tabla 2.2.1-1: Detalle de bacterias según rango de temperaturas

Temperaturas mayores a los 60°C pueden deteriorar el proceso de biodigestión, lo que hace imprescindible un control constante de la temperatura del proceso.

2.2.2. pH

El pH es el parámetro de control más importante. El pH óptimo para las bacterias metanogénicas se encuentra entre 6 y 8. Sin embargo, se considera que, para lograr actividad óptima de todos los microorganismos en el reactor, conviene acotar este valor cerca de 7 (entre 6,5 y 7,5). A su vez, es necesario que el sistema cuente con un mecanismo de regulación de manera tal de permitir la producción de ácidos volátiles y dióxido de carbono. Se debe prevenir fluctuaciones en el pH debido a la generación de estas sustancias, por lo que se recomienda a veces utilizar alcalinos tales como cal, carbonato de sodio o bicarbonato de sodio.

2.2.3. Mezclado

El mezclado sirve tanto para la regulación del pH como para lograr condiciones ambientales homogéneas. De no producirse una mezcla adecuada, se pueden desarrollar microambientes dentro del ambiente. En la medida en que se logre una distribución adecuada de reguladores de pH, se evitarán altas concentraciones de productos metabólicos intermedios que pueden llegar a inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas.

2.2.4. Control de amoníaco y sulfuro

El metabolismo anaeróbico puede reducirse debido a altas concentraciones de amoníaco (NH_3). Si bien puede existir una aclimatación de estas bacterias, grandes fluctuaciones pueden obstruir el proceso. Con pH alto, el amoníaco es más tóxico que su ión (NH_4^+). La adición de ácidos pueden controlar los niveles elevados de pH y amoníaco que, de otra manera, pueden llegar a generar fallas en el sistema.

2.2.5. Requerimientos de nutrientes

La digestión anaeróbica requiere de elementos esenciales como níquel y cobalto en pequeñas concentraciones (menos de 100 partes por millón). Estos materiales promueven la metanogénesis. Estos elementos se pueden encontrar en la mayoría de los desechos.

2.2.6. Tiempo de retención de sólidos

El tiempo de retención de sólidos es el período que una partícula se queda en el reactor. En el proceso de crecimiento en suspensión, el TRS es igual para todas las partículas. Sin embargo, en otros tipos de procesos, el TRS puede diferir.

2.2.7. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico es la variable más importante en los reactores anaeróbicos contracorriente (upflow). Este tiempo, que depende de las características de los residuos tratados y las condiciones medioambientales, debe ser lo suficientemente largo como para permitir que las bacterias anaeróbicas metabolicen dentro de los digestores. Aquellos reactores anaeróbicos cuyas bacterias se encuentran pegadas al mismo suelen tener bajos tiempos de retención hidráulica (de 1 a 10 días). Por su parte, los que tienen bacterias dispersadas en su medio y no están pegadas al digestor, suelen tener tiempos mayores (de 10 a 60 días). Tanto la digestión mesofílica como la termofílica suelen tener tiempos de retención aproximados de 25-35 días.

2.2.8. Sólidos Totales (TS)

Es el porcentaje de la materia que queda una vez sometida a ésta a una temperatura de 105°C el tiempo suficiente hasta que no haya más disminución de peso (el remanente se la considera materia seca).

2.2.9. Sólidos Volátiles (VS)

Es el porcentaje de materia perdida una vez sometida la misma a combustión a una temperatura a la materia seca de 560°C.

2.2.10. Inhibidores

Los inhibidores más comunes se resumen en la tabla 2.2.10-1.

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA	UMB
SO ₄	5000	ppm
NaCl	40000	ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05	mg/ml
Cu	100	mg/l
Cr	200	mg/l
Ni	200-500	mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml)	25	mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40	mg/l
Na	3.500-5.500	mg/l
K	2.500-4.500	mg/l
Ca	2.500-4.500	mg/l
Mg	1.000-1.500	mg/l

Tabla 2.2.10-1: inhibidores del proceso de biodigestión.

3. INGENIERÍA DEL PROCESO

El proceso de biodigestión anaeróbica se puede dividir en cuatro etapas, según las esquematizadas en la figura 3-1.

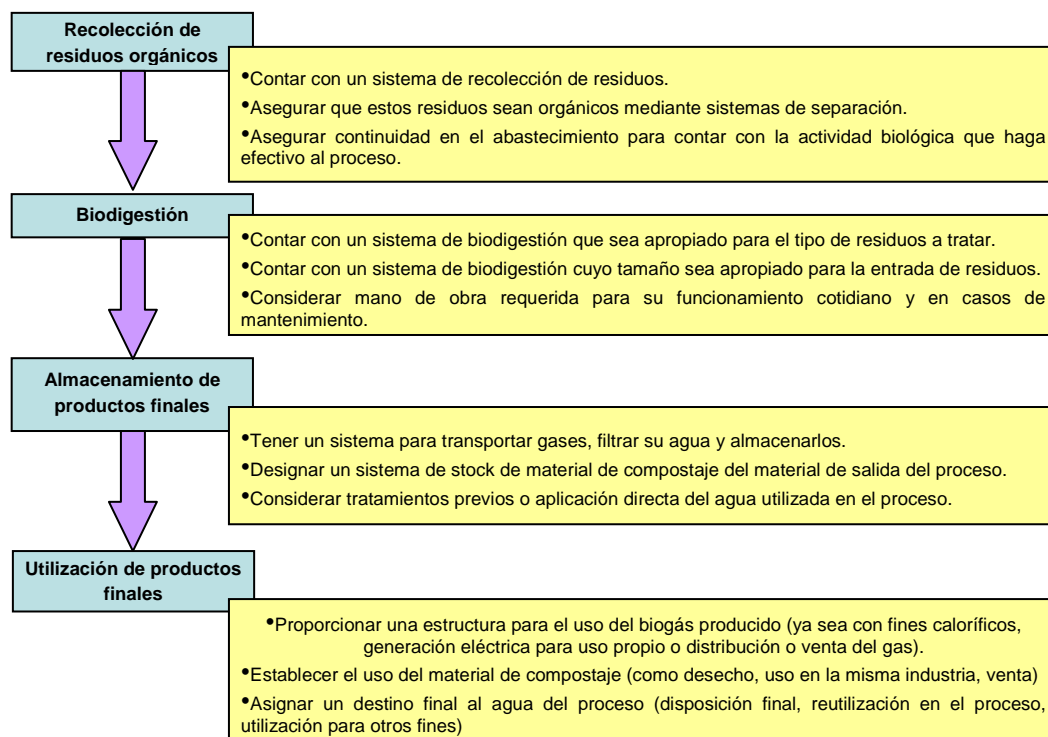


Figura 3-1: Etapas del proceso de biodigestión.

3.1. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

Algunas industrias de hacienda, ganado o de criaderos, suelen utilizar sistemas de manejo de residuos para el tratamiento de los mismos por razones sanitarias, medioambientales o para poder mejorar los procesos implicados en las mismas. Los residuos sin previo tratamiento se pueden coleccionar y almacenar en distintos estados (líquido, lodoso, semisólido y sólido). Es necesario contar con un sistema de recolección (ya sea este manual, mecánico o totalmente automatizado) de manera tal de poder asegurar una reposición frecuente del material orgánico para permitir que la actividad biológica se lleve a cabo. En este contexto, se debe considerar que se requiere de una centralización previa del ganado ya que, de lo contrario, los costos de recolección involucrados superarían con creces cualquier otro tipo de ahorro en el sistema.

Se pueden distinguir cuatro tipos de residuos que serán tratados a continuación.

3.1.1. Residuos sin tratar

Los excrementos animales suelen tener un contenido de sólidos del 8 al 25%, dependiendo del tipo de animal y su dieta. Los mismos pueden ser diluidos mediante el uso de agua o espesados por medio del secado con aire o el agregado de material de asiento.

3.1.2. Residuos líquidos

Son aquellos excrementos con un contenido total de sólidos menor al 5%. Esta composición se suele obtener al drenar el estiércol del punto donde fueron excretados mediante la utilización de agua (ya sea esta fresca o reciclada). Esta agua luego suele ser tratada antes de ser reutilizada para su aplicación o directamente descartada en los afluentes cloacales.

3.1.3. Residuos lodosos

El contenido de sólidos se encuentra entre el 5 y el 10%. Suelen ser colectados mediante palas. Este tipo de residuos puede ser bombeado, almacenado y tratado antes de su utilización, por ejemplo, para la aplicación en la tierra. Para llegar a dicho porcentaje de solución, suelen tener agua como agregado.

3.1.4. Residuos semisólidos

El contenido de sólidos es del 10 al 20%. No se les agrega agua y suelen ser paleados. Este tipo de estiércol se puede utilizar para la producción de biogas y/o energía ya que al calentarlo se promueve el crecimiento de bacterias.

3.1.5. Residuos sólidos

Tienen una concentración mayor al 20% y suelen ser paleados también. El estiércol sólido que se lo deja asentar o secar (por ejemplo, dejado el dejado sin tratamiento en las pasturas) no es efectivo para la generación de biogas.

3.2. BIODIGESTIÓN

El biodigestor es el componente del sistema de manejo de residuos en donde se los descompone y se los trata por medio de la actividad de bacterias anaeróbicas para generar biogás. Estos digestores tienen una cobertura impermeable al aire de manera de poder contener el biogás producido. La elección del tipo de biodigestor a utilizar se encuentra sujeta al sistema existente de manejo de residuos que cuenta la granja y al tamaño de la misma. El biodigestor debe estar diseñado para operar en conjunto con todos los procesos llevados a cabo en la instalación.

La tabla 3.2-1 resume las características de los tipos de biodigestores más adecuados para este tipo de industria.

Características	Tipo de digestor			
	Laguna Cubierta	Mezcla Completa	Plug-flow	Film
Contenedor del digestor	Piletón Profundo	Tanque cilíndrico o rectangular por sobre/debajo del nivel del suelo	Rectangular bajo tierra	Tanque por encima del nivel del suelo
Nivel de tecnología	Baja	Media	Media	Alta
Requerimientos caloríficos adicionales	No	Si	Si	No
Sólidos Totales	0,5 - 3%	3 - 10%	11 - 3%	3%
HRT(días)	40 - 60	15+	15+	2 - 3
Tipo de industria	Vacuna, porcina	Vacuna, porcina	Vacuna	Vacuna, porcina
Clima óptimo	Templado, cálido	Todos	Todos	Templado, cálido

Tabla 3.2-1: biodigestores más utilizados en la industria agraria.

Un resumen de los distintos biodigestores, las concentraciones de sólidos, el tipo de tratamiento y el uso de los mismos se presenta en la figura 3.2-1.

		Concentración de sólidos totales - TS (%)																														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Excremento	Con agua adicionada											Con aditivos para relleno																				
	Tal y como es excretado																															
Clasificación	Líquido	Lodoso					Semisólido										Sólido															
Manejo	Bombeo					Paleado															Paleado y comprimido											
Producción de Biogás	Recomendado															No recomendado																
Tipo de Biodigestor	Covered Lagoon / Fixed Film	Complete Mix					Plug Flow																									

Figura 3.2-1: Biodigestores más utilizados según concentración objetivo

3.2.1. Digestor de Laguna Cubierta (Covered Lagoon Digester)

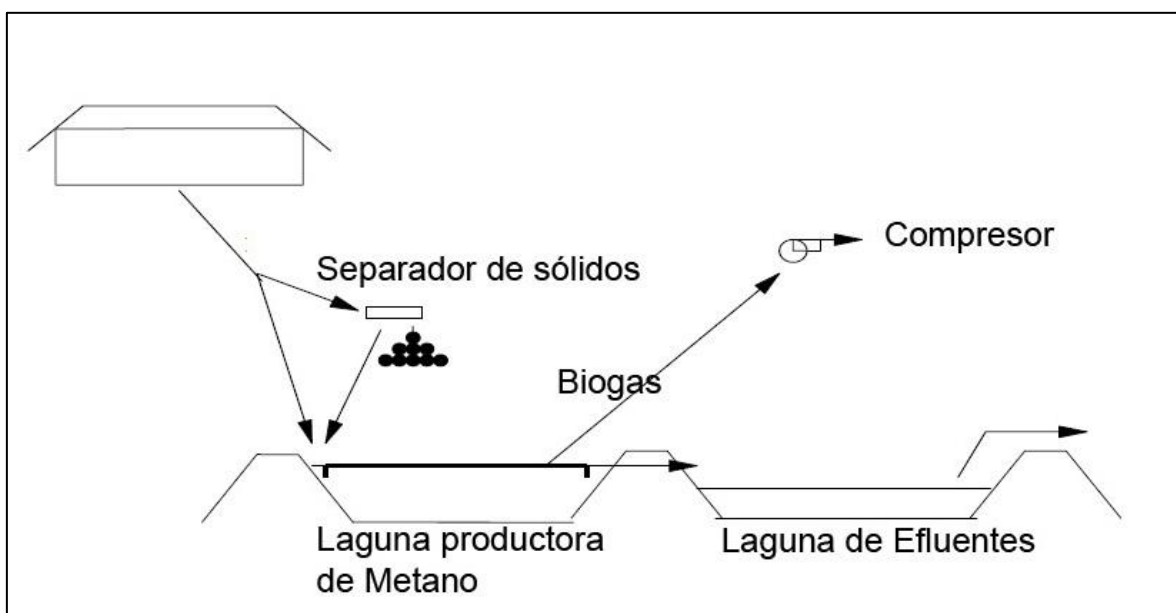


Figura 3.2.1-1: Diseño de un Biodigestor de Laguna Cubierta.

Son utilizados para tratar excremento líquido con concentraciones de sólidos menores al 3% (es preciso diluir el estiércol). Por lo general, se requieren de grandes volúmenes de lagunas ya que por cálculo se estima un tamaño equivalente al flujo total durante un período de 40 a 60 días ya que no reciben calor adicional y trabajan a temperaturas ambientes. Su utilización es conveniente para climas cálidos y, de instalarse en lugares fríos, su uso se encuentra limitado como productor estacional de biogás (durante los períodos en los que incrementa

la temperatura) y como control de olores. Hay dos tipos de coberturas para estas lagunas: completa (bank-to-bank) y modular. La cubierta completa se suele utilizar en regiones donde las lluvias son entre moderadas e intensas. En cambio, los cobertores modulares sirven para las regiones áridas.

Su principal ventaja es la falta de necesidad de calentamiento y su bajo nivel de tecnología (lo que facilita su mantenimiento y disminuye los costos). La desventaja surge en la tardanza del proceso de biodigestión debido a las bajas temperaturas de funcionamiento y al hecho de que se requiere de una superficie mucho mayor que otros digestores. El biodigestor se compone en una primera instancia de un separador de sólidos, donde lo que se busca es llegar a concentraciones de sólidos del 3% aproximadamente. Una vez separados los sólidos, el efluente licuado se deposita en la primer laguna que es donde se realiza la biodigestión propiamente dicha.

Transcurrido el tiempo de retención hidráulico estipulado, el efluente pasa a otra laguna, comúnmente denominada laguna de efluentes donde luego se lo puede separar para utilizar parte del material resultante como fertilizante. Sin embargo, este tipo de digestores está más destinado a la descomposición de los residuos que a la generación in situ de energía. El proceso suele requerir de poco control ya que la temperatura del digestor de laguna cubierta es la de ambiente. Esto genera que la generación de biogás sea variable en función de las condiciones climáticas, por lo que no se puede contar con una generación constante de metano mediante este proceso.

3.2.2. Digestor de Mezcla Completa (Complete Mix Digester)

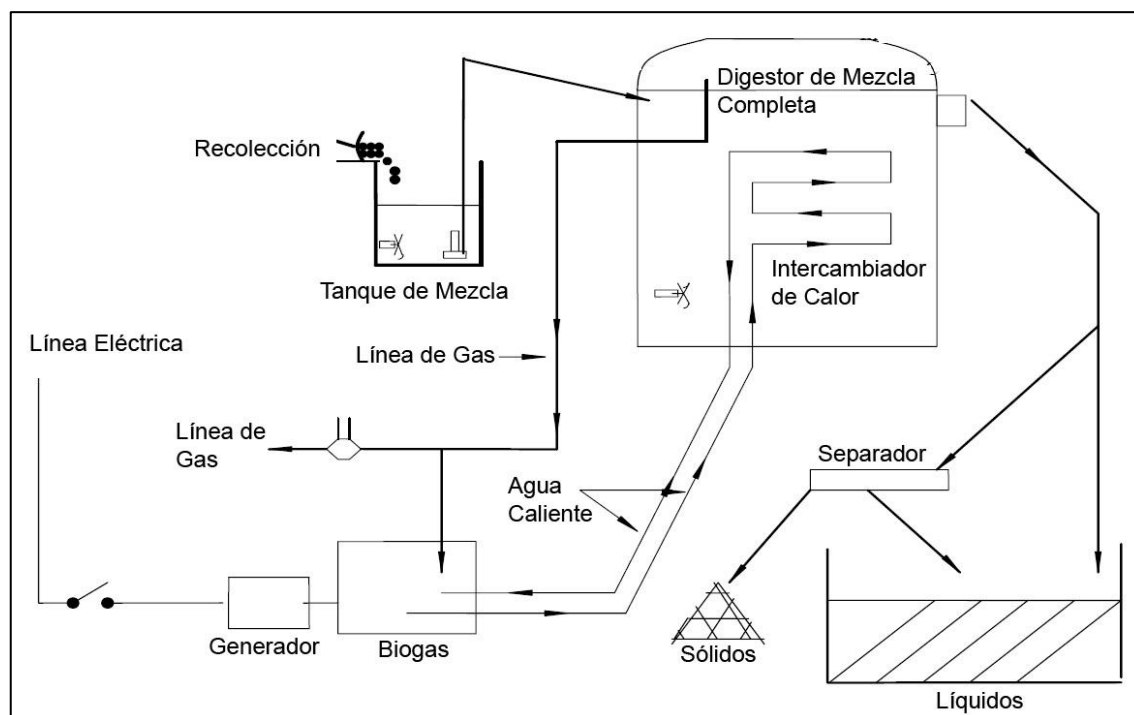


Figura 3.2.2-1: Diseño de un Biodigestor de Mezcla Completa.

Son tanques que están instalados por debajo o sobre el suelo, diseñados para tratar residuos con una concentración de sólidos entre el 2,5 y el 10%. Estas estructuras requieren de una menor superficie que los de laguna cubierta pero necesitan trabajar a una mayor temperatura, por lo que es menester brindarles una fuente de calor. La estructura suele construirse por sobre o debajo del suelo y los principales materiales pueden componerse de concreto, acero o fibroglas. El estiércol se deposita en un tanque de mezcla donde se le agrega agua para llegar a una concentración objetivo estipulada. Una vez realizado esto, el efluente pasa al biodigestor donde se mezcla completamente con las sustancias que están ya allí dentro obteniendo una concentración homogénea de sólidos y una actividad bacteriológica constante en todo el biodigestor.

En la mayoría de los modelos parte del biogás producido es destinado a calentar el biodigestor mismo. Opcionalmente, se le puede adjuntar un generador a gas como para conectarlo a la energía eléctrica. El efluente resultante del proceso de biodigestor se puede tratar mediante un separador de sólidos para quitarle los sólidos y luego ser utilizado como fertilizante.

3.2.3. Digestor de Flujo (Plug Flow Digester)

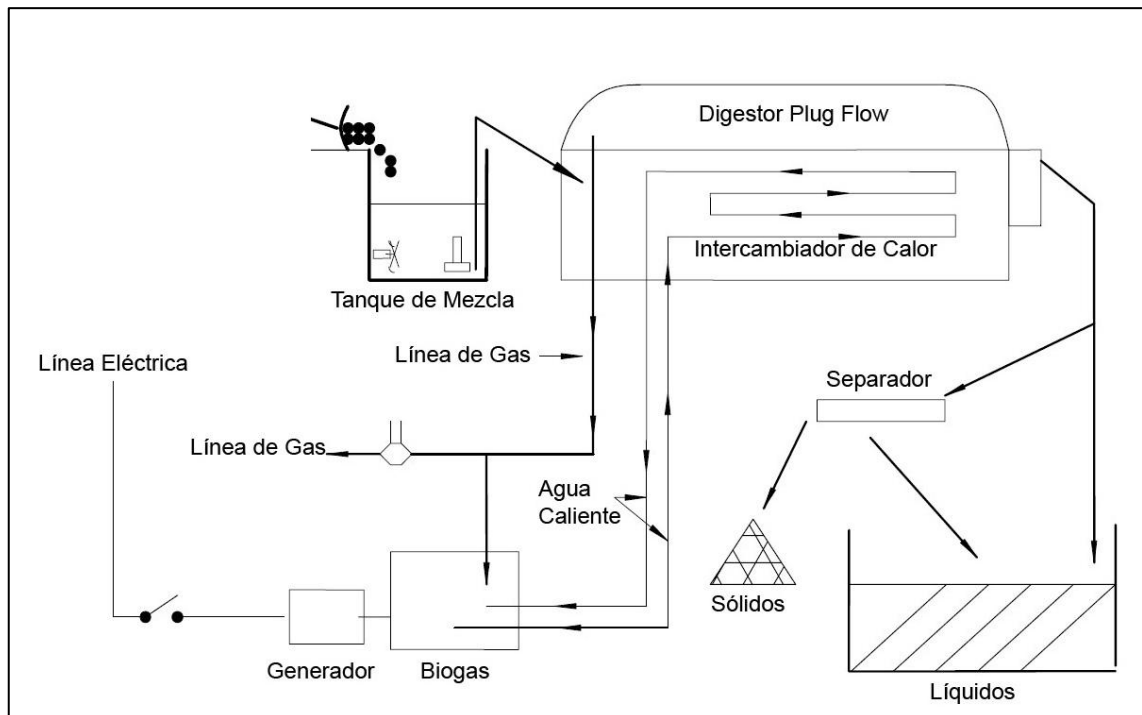


Figura 3.2.2-1: Diseño de un Biodigestor de Flujo.

Son tanques rectangulares para tratar residuos con una concentración de sólidos del 11 al 13%. Este tipo de digestores no está diseñado para residuos sin fibras, por lo que los excrementos de cerdos no pueden ser tratados. Si bien el proceso en el biodigestor de flujo es muy parecido al de mezcla completa, la principal diferencia reside en el mecanismo del biodigestor. En este caso, la mezcla del material a ser biodigerido no homogénea, sino que la actividad anaeróbica se va incrementando a medida que el flujo avanza hacia la salida del biodigestor. En este sentido, es menester mantener un flujo adecuado para que el efluente atraviese el biodigestor en el tiempo de retención hidráulico establecido por cálculo. Las condiciones mismas de diseño requieren que el tanque de biodigestión sea más alargado como para permitir este tipo de flujo.

3.2.4. Digestores de Película Fija (Fixed Film Digester)

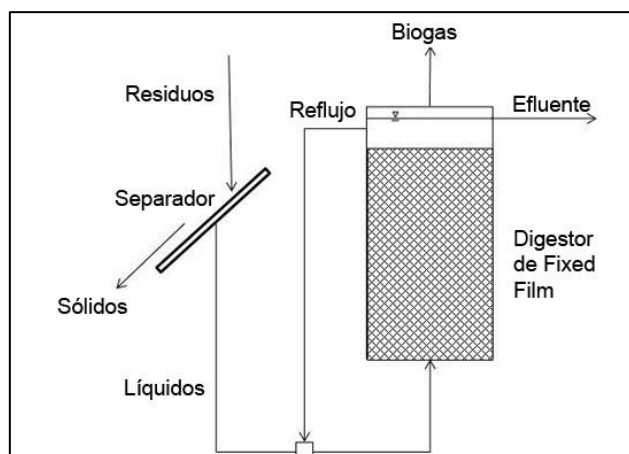


Figura 3.2.4-1: Digestor de Película Fija.

Consiste de un tanque en el cual hay películas de plástico, las cuales contienen una fina capa de bacterias anaeróbicas llamadas biofilm. A medida que los residuos pasan por este medio, se va produciendo biogás. Los digestores de película están diseñados para trabajar con residuos diluidos (operan con una concentración de sólidos del 3% aproximadamente). De manera similar a la de los biodigestores de laguna cubierta, es necesaria la utilización de un separador previo como para diluir la mezcla. Sin embargo, los tiempos de retención hidráulicos debido a la exposición que tiene la mezcla a la alta concentración de bacterias anaeróbicas que contienen estas cintas suelen ser mucho menores (alrededor de los 3 días). Lo que hace posible un manejo intensivo del efluente a ser biodigerido.

3.3. PRODUCTOS DE LA BIODIGESTIÓN

3.3.1. Biogas

Para calcular la producción óptima de metano, se utiliza el modelo de Chen y Hashimoto [Hashimoto, 1982], una adaptación del modelo cinético de Contois [Contois, 1959].

En este modelo, se parte de la relación volumétrica de metano (fórmula 3.3.1-1).

$$V = \frac{B_0 \times S_0}{HRT} \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (3.3.1-1)$$

Donde:

V es la relación volumétrica de metano $\left[\frac{m^3}{m^3 \text{ día}} \right]$;

HRT es el tiempo de retención hidráulico $[\text{días}]$;

B_0 es la producción máxima de metano cuando HRT tiende a infinito $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$; esta

variable dependerá del tipo de residuo del que se trate. En caso de tratarse de actividad agraria, se recomienda hacer un estudio de para poder estimar este valor para cada uno de los animales de manera tal de poder estimarla lo mejor posible ya que es uno de los determinantes principales de la generación de metano.

S_0 es la concentración en volumen de sólidos volátiles del efluente entrante $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

K es un parámetro cinético adimensional;

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $\left[\frac{1}{\text{día}} \right]$.

La relación volumétrica de metano establece cuántos metros cúbicos de metano se pueden obtener por día por metro cúbico de biodigestor.

S_0 se puede calcular mediante la fórmula 3.3.1-2.

$$S_0 = \frac{SV_e}{E_e} \quad (3.3.1-2)$$

Donde $SV_e \left[\frac{kg}{\text{día}} \right]$ es la masa de sólidos volátiles SV $[kg]$ que ingresa por día y E_e

es el volumen del efluente entrante diario que contiene dicha masa $\left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]$.

La masa de sólidos volátiles SV se puede calcular mediante la fórmula 3.3.1-3.

$$SV = ST \times r_{TV} \quad (3.3.1-3)$$

Donde ST es la masa de sólidos totales $[kg]$ y r_{TV} es la relación porcentual entre la masa de sólidos volátiles y la masa de sólidos totales $\frac{SV}{ST}$ del estiércol. A su vez, ST se puede calcular con la fórmula 3.3.1-4.

$$ST = SS \times r_{ST} \quad (3.3.1-4)$$

Donde SS es la masa de estiércol $[kg]$ y r_{ST} es la relación porcentual entre la masa de sólidos totales y la masa de estiércol $\frac{ST}{SS}$. Por lo tanto, SV se puede calcular mediante la fórmula 3.3.1-5.

$$SV = SS \times r_{ST} \times r_{TV} \quad (3.3.1-5)$$

La variable K es un parámetro cinético adimensional y está determinado por la fórmula 3.3.1-6.

$$K = 0,8 + 0,0016 \times e^{0,06 \times S_0} \quad (3.3.1-6)$$

$$K \leq 1,64 \text{ [Rooset } al., 2004]$$

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $\left[\frac{1}{\text{día}} \right]$, y viene dada por la fórmula 3.3.1-7.

$$\mu_m = 0,013 \times T - 0,129 \quad (3.3.1-7)$$

Donde T es la temperatura de funcionamiento del biodigestor $[^\circ C]$.

Por su parte, la producción diaria de metano $V_{CH_4} \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]$ se puede expresar mediante la fórmula 3.3.1-8.

$$V_{CH_4} = V_d \times V \quad (3.3.1-8)$$

Donde V_d es el volumen del biodigestor $[m^3]$.

3.3.2. Fertilizante

No es correcto atribuir la misma influencia del terreno a cantidades equivalentes de elementos químicos elaborados industrialmente a los que son proporcionados por un fertilizante de origen orgánico debido a factores tales como estructura de los mismos, capacidad de retención de agua e intercambio con el suelo.

Para un análisis concreto de los beneficios incurridos al tomar los residuos del proceso de biodigestión como fertilizante, sería conveniente estudiar el poder fertilizante del efluente del biodigestor debido a que éste es el resultado de un proceso biológico, las características del material fertilizante dependerán de factores tales como nutrición del animal, característica de los suelos, climatología, cultivo, entre otros.

Para obtener la eficiencia del material ya biodegradado, se puede hacer un análisis de eficiencia del nitrógeno. La eficiencia del nitrógeno es una medida que determina cuántos kilogramos por hectárea extra se obtendrán de materia deshidratada durante la cosecha por cada kilogramo extra de nitrógeno aplicado. En promedio, se obtiene una eficiencia del nitrógeno de 64 para el excremento de vacuno ya tratado y 50 para el mismo excremento sin tratar [Ortenblad, 2000], lo que demuestra una mejoría en el efluente una vez ya biodegrado con respecto a los sin tratar. Los resultados para cada animal deben calcularse por separado.

Otra forma de contrastar el poder fertilizante es comparando el tamaño de cosecha por hectárea utilizando como material fertilizante la misma masa de excremento sin tratar y de efluente ya tratado (tabla 3.3.2-1). En este sentido, se aprecia que también hay un incremento de la capacidad fertilizante por unidad de masa del material tratado con respecto al excremento sin previo tratamiento.

La principal razón de este incremento del poder fertilizante es debido a que una mayor proporción del nitrógeno se encuentra ya ionizado en el efluente que en el estiércol sin tratar.

	Cow effluent	Cow manure	Pig effluent	Pig manure
Whole plant				
Biomass yield, tonnes/ha	8.89	7.53	8.48	6.83
Plant DM,%	20.98	21.98	21.65	24.42
Protein in DM,%	23.06	18.42	23.75	22.91
Protein yield, tonnes/ha	0.43	0.30	0.43	0.38
Crude fibre in DM,%	23.44	20.62	22.82	23.65
Leaf				
Leaf, % in plant	73.17	71.35	75.52	72.45
Leaves, tonnes/ha	6.50	5.37	6.40	4.95
Leaf DM,%	21.25	22.72	21.50	24.67
Protein in leaf DM,%	27.25	24.25	27.91	24.18
Protein yield of leaf, tonnes/ha	0.38	0.29	0.38	0.30
Crude fibre in leaf DM,%	15.71	15.24	18.35	16.80
Stem				
Stem yield, tonnes/ha	2.40	2.17	2.08	1.88
Stem DM,%	17.85	18.36	20.51	24.30
Protein in stem DM,%	10.39	9.77	12.32	10.23
Protein yield of stem, tonnes/ha	0.05	0.04	0.05	0.05
Crude fibre in stem DM,%	35.19	33.07	37.35	32.82
Plant height, cm	68.63	65.56	65.64	59.83

Tabla 3.3.2-1: Efectos de la aplicación del excremento de vaca y cerdo biodegradado anaerómicamente y sin tratar [Chau, 1998].

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1. METODOLOGÍA

Debe considerarse que la capacidad de generación de metano dependerá de variables tales como tipo de suelos, nutrición de y tipo de animales de los cuales se trate así como condiciones climatológicas en las cuales se encuentre el biodigestor (especialmente temperatura). Para un correcto diseño del biodigestor es necesario medir de manera adecuada la producción máxima de metano B_0 , los sólidos totales $ST\%[\%]$ y los sólidos volátiles S_0 de cada de la excreta de cada uno de los animales. Debido a que la cantidad de ejemplos a tratar, considerando que cada industria puede tener diferentes cantidades y tipos de animales, se procede a trabajar única y exclusivamente con el estudio de las vacas. Para un mejor análisis, se toman valores de producción máxima de metano B_0 , de sólidos totales $ST\%[\%]$ y los sólidos volátiles S_0 promedio.

A su vez, es necesario considerar que, dado que la temperatura varía a lo largo del año, se encuentra una marcada estacionalidad en la generación de metano si éste dependiese de la temperatura ambiente, o una marcada estacionalidad del consumo de gas metano durante las estaciones más frías. Con fines analíticos, se consideran temperaturas promedio.

En este capítulo se procede a plasmar los cálculos necesarios y las suposiciones tomadas para poder llegar a establecer todas las condiciones de diseño, la capacidad de generación y los gastos asociados en función de cuatro variables que se consideran clave en el proceso de biodigestión:

- Concentración de sólidos objetivo $ST\%[\%]$
- El tiempo de retención hidráulico $HRT[días]$
- Temperatura de funcionamiento del biodigestor $T[°C]$
- Tamaño del ganado $N[vacas]$

A su vez, se plantean limitantes de diseño en cuanto a tecnologías y control de procesos de manera tal de poder así hacer una primera aproximación a los

cálculos necesarios para una evaluación económica de la instalación de un biodigestor. Para estos fines se analizan los rendimientos que se obtienen por vaca de manera de desligar el tamaño del biodigestor y aproximar, en una primera instancia, cuales son los valores de las variables que mejor optimizan el proceso de biodigestión objetivo y hacer así un primer descarte de algunos rangos de las otras tres variables en cuestión.

Como última etapa, se presentan 3 tipos de escala de ganados de manera tal de poder reflejar 3 situaciones y aplicaciones diferentes de la biodigestión anaeróbica y sus beneficios.

Para estos fines, se definen las siguientes constantes:

- Producción máxima $B_0 = 0,304 \left[\frac{m^3 CH_4}{kg VS} \right]$ (Agstarhandbook)
- Excremento vacuno diario $SS_v = 3 \frac{kg}{vaca \cdot día}$
- Relación porcentual entre la masa de sólidos volátiles y la masa de sólidos totales $r_{TV} = 86\%$
- Relación porcentual entre la masa de sólidos totales y la masa de estiércol $r_{ST} = 15\%$

De este manera, el volumen de efluente se puede calcular por la fórmula 4.1-1.

$$SS_e = SS_v \times N \quad (4.1-1)$$

Donde SS_e es la masa de estiércol SS que ingresa por día $\left[\frac{kg}{día} \right]$.

4.2. VARIABLES DE DISEÑO

Si bien los kilogramos de estiércol SS , los kilogramos de sólidos totales ST y los kilogramos de sólidos volátiles SV dependen del número y tipo de animales, de su alimentación y del tipo de suelos en donde se realice la deposición de los estiércoles, estos valores, al tratarse única y exclusivamente de ganado vacuno, pueden ser consideradas como constantes y fijas siempre y cuando se logre una

frecuencia de recolección de residuos. Este último punto es fundamental ya que la capacidad de producción de metano se ve reducida si el excremento se deja decaer al exponerse a la actividad aeróbica en la intemperie. La actividad aeróbica se encarga de descomponer los sólidos volátiles del excremento, reduciendo así la capacidad de producción máxima del mismo B_0 . Un excremento que se deja a la intemperie sin ser tratado hasta secarse cuenta con una capacidad de producción máxima de metano del 65-70%. Esto equivale a establecer que, bajo estas condiciones, B_0 se reduce hasta un 65-70% de su valor original [Nijaguna, 2006].

Si bien la concentración en masa de sólidos totales $ST\%$ no muestra una influencia directa en la producción de metano, dicha producción se ve afectada en forma indirecta por la manera en que $ST\%$ afecta a la concentración en volumen de los sólidos volátiles S_0 . A su vez, esta concentración determina el volumen de efluente entrante diario.

Esta concentración se calcula con la fórmula 4.2-1.

$$ST\% = \frac{ST}{ME + ST} \quad (4.2-1)$$

Donde el divisor corresponde a la masa total del efluente y puede ser calculada mediante la suma de sólidos totales ST y la masa de agua total del efluente ME . Esta masa de efluente corresponde tanto a los líquidos residuales del estiércol como al agua adicionada para lograr dichas concentraciones. La masa total de efluente ME se puede calcular mediante la fórmula 4.2-2.

$$ME = MA + SS \times (1 - r_{ST}) \quad (4.2-2)$$

Donde MA es la masa de agua agregada $[kg]$. Análogamente, se puede estimar la masa de agua total del efluente ME que ingresa por día ME_e mediante la fórmula 4.2-3.

$$ME_e = MA_e + SS_e \times (1 - r_{ST}) \quad (4.2-3)$$

Donde ME_e es la masa de agua total del efluente ME que ingresa por día $\left[\frac{kg}{día} \right]$, MA_e es la masa de efluente agregada por día $\left[\frac{kg}{día} \right]$ y SS_e la masa de estiércol SS que ingresa por día $\left[\frac{kg}{día} \right]$.

De la misma forma, se puede transcribir esta igualdad en términos de efluente entrante (fórmula 4.2-4).

$$ST\% = \frac{ST_e}{ME_e + ST_e} \quad (4.2-4)$$

Donde ST_e es la masa de sólidos totales ST que ingresa por día $\left[\frac{kg}{día} \right]$. Combinando las ecuaciones 3.3.1-3 y 4.2.1-4, se puede establecer la fórmula 4.2-5.

$$ST\% = \frac{SS_e \times r_{ST}}{ME_e + SS_e \times r_{ST}} \quad (4.2-5)$$

Asumiendo cambios de volumen despreciables por la adición de los sólidos totales [Nijaguna, 2006], el volumen del efluente es igual al volumen de agua que este contenga. De esta manera, se puede estimar el volumen de efluente entrante diario E_e para un $ST\%$ y un SS_e dados (fórmula 4.2-6).

$$E_e = \frac{ME_e}{\rho_{ME}} = \frac{SS_e \times r_{ST}}{\rho_{ME}} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \quad (4.2-6)$$

Donde ρ_{ME} es la densidad de agua del efluente y $\rho_{ME} = 1 \frac{kg}{L} = 1000 \frac{kg}{m^3}$. De esta manera, mediante la ecuación 3.3.1-8 y 4.2-6 se puede estimar el volumen del biodigestor V_d en función del tiempo de retención hidráulico HRT y la concentración en masa de sólidos totales $ST\%$ (4.2-7)

$$V_d = HRT \times \frac{SS_e \times r_{ST}}{\rho_{ME}} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \quad (4.2-7)$$

Combinando la fórmula 4.1-1 con la 4.2-7 se obtiene la fórmula 4.2-8

$$V_d = HRT \times \frac{SS_v \times N \times r_{ST}}{\rho_{ME}} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \quad (4.2-8)$$

La limitación de $2,5\% \leq ST\% \leq 13\%$ para abarcar todos los tipos de biodigestores, hace que la variable $ST\%$ sea una determinante en el diseño. Combinando las ecuaciones 3.3.1-5 y 4.2-6, se puede establecer la fórmula 4.2-9.

$$S_0 = \frac{\rho_{ME} \times r_{TV}}{\left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right]} \quad (4.2-9)$$

Combinando las fórmulas 3.3.1-1, 3.3.1-4, 3.3.1-8, 4.1-1, 4.2-8 y 4.2-9, se puede expresar la producción diaria de gas metano mediante las fórmulas 4.2-10 y 4.2-11.

$$V_{CH_4} = SV_e \times B_0 \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (4.2-10)$$

$$V_{CH_4} = N \times r_{ST} \times r_{TV} \times B_0 \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (4.2-11)$$

Por su parte, combinando las fórmulas 3.3.1-6 y 4.2-9, K se puede expresar mediante la fórmula 4.2-12

$$K = 0,8 + 0,0016 \times e^{0,06 \times \frac{\rho_{ME} \times r_{TV}}{\left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right]}} \quad (4.2-12)$$

Donde $K \leq 1,64$.

Como se observa en las fórmula 4.2-11 y 4.2-12, se puede calcular la generación diaria de gas metano por vaca para una combinación de HRT , $ST\%$ y $T^\circ C$ dadas independientemente del tamaño del ganado mediante la fórmula 4.2-13.

$$dV_{CH_4} = r_{ST} \times r_{TV} \times B_0 \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (4.2-13)$$

Donde dV_{CH_4} es la producción diaria de gas metano por vaca $\left[\frac{m^3 CH_4}{vaca \cdot día} \right]$.

4.3. PRINCIPALES GASTOS OPERATIVOS

4.3.1. Licuar efluentes

Asumiendo que el 100% del agua agregada es de napa, a una profundidad de napa de profundidad H [m], el gasto diario de energía $E[MA_e]$ en $\left[\frac{kCal}{día} \right]$ para bombear la masa de agua agregada al efluente por día MA_e se puede expresar mediante la fórmula 4.3.1-1.

$$E[MA_e] = MA_e \times g \times H \approx E_e \times g \times H \quad (4.3.1-1)$$

Donde g es la aceleración gravitacional $\left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Si bien se podría considerar el gasto energético de bombear únicamente el agua de napa, se considera también el líquido contenido dentro del digestor como para una mejor aproximación ya que es necesario mantener cierta velocidad de flujo dentro del biodigestor para su correcto funcionamiento y esto requiere de un gasto energético que puede ser considerado incluyendo el líquido contenido dentro del estiércol como parte del total al ser bombeado.

Asumiendo un rendimiento η_b para una bomba, el gasto de bombeo de agua se puede expresar mediante la fórmula 4.3.1-2.

$$E_b = \frac{E_e \times g \times H}{\eta_b} = \frac{N \times SS_v \times r_{ST}}{\rho_{ME}} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \times \frac{g \times H}{\eta_b} \quad (4.3.1-2)$$

Como se observa, para un valor dado de $ST\%$, se puede calcular el gasto diario incurrido para licuar los efluentes por vaca, independientemente del tamaño del ganado mediante la fórmula 4.3.1-3.

$$dE_b = \frac{SS_v \times r_{ST}}{\rho_{ME}} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \times \frac{g \times H}{\eta_b} \quad (4.3.1-3)$$

Donde dE_b es la energía diaria necesaria para licuar los efluentes por vaca $\left[\frac{kCal}{vaca \cdot día} \right]$ para un $ST\%$ dado. Para los fines de evaluación se considera un valor de $\eta_b = 0,85$.

4.3.2. Calentar Efluentes

Asumiendo que la temperatura T del biodigestor [$^{\circ}C$] debe ser constante, así como la masa contenida dentro del mismo para mantener su volumen y funcionamiento. Se puede expresar que el gasto energético diario para calentar la masa dentro del biodigestor mediante la fórmula 4.3.2-1.

$$E[Q_b] = \frac{ME_s \times h_T - ME_e \times h_{T0}}{\eta_h} \quad (4.3.2-1)$$

Donde ME_s es el flujo de masa que sale del biodigestor $\left[\frac{kg}{día} \right]$, h_T es la entalpía específica de dicho flujo de masa $\left[\frac{kCal}{kg} \right]$ para una temperatura T [$^{\circ}C$], h_{T0} es la entalpía específica para un flujo de masa a la temperatura $T0$ a la cual entra el fluido [$^{\circ}C$] y η_h es el rendimiento del intercambiador de calor. Dado que, por condiciones de continuidad y considerando que el biodigestor contiene una masa de fluido constante, se puede expresar que $ME_s = ME_e$.

Por ende, la energía necesaria para calentar la masa dentro del biodigestor se puede expresar mediante la fórmula 4.3.2-2.

$$E[Q_b] = \frac{ME_e \times (h_T - h_{T0})}{\eta_h} \quad (4.3.2-2)$$

Combinando las fórmulas 4.2-5, 4.1-1 y 4.3.2-2 se obtiene la fórmula (4.3.2-3)

$$E[Q_b] = N \times SS_v \times r_{ST} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \times \frac{h_T - h_{T0}}{\eta_h} \quad (4.3.2-3)$$

De manera similar a la ya planteada, para un $ST\%$ y una $T^\circ C$ dados, se puede estimar el gasto energético diario por vaca para calentar el efluente, independientemente del tamaño del biodigestor según la fórmula 4.3.2-4.

$$E[Q_b] = SS_v \times r_{ST} \times \left[\frac{1}{ST\%} - 1 \right] \times \frac{h_T - h_{T0}}{\eta_h} \quad (4.3.2-4)$$

Para los fines de evaluación se considera un valor de $\eta_h = 0,50$.

4.3.3. Comprimir Gas Metano

La energía necesaria para la compresión del gas metano se puede expresar mediante la fórmula 4.3.3-1.

$$W_s = c_p T \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p}} \quad (4.3.3-1)$$

Donde W_s es el trabajo de compresión, c_p es el calor específico del metano a presión constante, c_v es el calor específico del metano a volumen constante, P_1 es la presión inicial, P_2 es la presión final, T es la temperatura a la cual se realiza la compresión. Para los fines de evaluación económica, se consideran las siguientes constantes:

$$c_p = 2,2319 \frac{KJ}{kg^\circ K}$$

$$c_v = 1,7137 \frac{KJ}{kg^\circ K}$$

$$T = 300^\circ K$$

$$P_1 = 1atm$$

$$P_2 = 100atm$$

Dado un rendimiento $\eta_c = 0,6$ para un compresor, la energía diaria necesaria para comprimir el gas metano se puede expresar mediante la fórmula 4.3.3-2.

$$E_c = \frac{V_{CH_4} \rho_{CH_4} \times c_p T \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p}}}{\eta_c} \quad (4.3.3-2)$$

Donde ρ_{CH_4} es la densidad de gas metano a condiciones normales de presión y temperatura. Considerando que, dados los valores de HRT , $ST\%$ y $T^\circ C$, el volumen diario generado V_{CH_4} es directamente proporcional al número de vacas y las demás variables del cálculo de energía de compresión son constantes, se puede establecer que dados los valores de HRT , $ST\%$ y $T^\circ C$ el gasto energético para comprimir el gas metano también resulta proporcional al número de vacas.

De esta manera, se puede establecer a su vez el gasto de comprimir dicho gas para una combinación de HRT , $ST\%$ y $T^\circ C$ dadas (fórmula 4.3.3-3).

$$E_c = \frac{dV_{CH_4} \rho_{CH_4} \times c_p T \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p}}}{\eta_c} \quad (4.3.3-3)$$

4.4. CONSIDERACIONES PREVIAS DE DISEÑO

Como se demostró en las secciones anteriores, tanto la generación de gas metano como los gastos para bombear y calentar efluentes y para comprimir el gas metano se pueden calcular por vaca para una combinación de HRT , $ST\%$ y $T^\circ C$. De esta manera, lo que se logra es poder evaluar estas 3 variables independientemente de la escala. De esta manera se pueden obtener ciertas métricas de funcionamiento por unidad de ganado (gastos energéticos, generación diaria de gas metano, etc.) que no son reflejadas en un primer análisis. Luego este valor se puede escalar como para obtener tantos los principales gastos. En esta sección se procede a evaluar estas variables así como otras condiciones previas de diseño que son factores esenciales a la hora de volcarse por algún tipo de biodigestor.

4.4.1. Limitaciones tecnológicas

Para todas las posibilidades a ser evaluadas, se trabajan con precios locales y materiales locales que se encuentran actualmente disponibles en Argentina. Desde este punto de vista, se considera como inviable la posibilidad de hacer un biodigestor tipo Fixed Film. Las principales razones son debido a limitaciones tecnológicas y de desarrollo que se requieren para realizar dicho tipo de biodigestores así como el minucioso cuidado que estos requieren para poder cerciorar las concentraciones de sólidos objetivos ya que mayores concentraciones podrían no sólo detener el proceso de biodigestión sino también dañar al biodigestor mismo.

4.4.2. Concentraciones objetivo

Una de las variables a considerar es la concentración en masa de sólidos totales $ST\%$, ya que un biodigestor complete mix funciona sólo para $2,5\% \leq ST\% \leq 10,5\%$, mientras que para un plugflow se requiere $10,5\% \leq ST\% \leq 13\%$. A su vez, para $ST\% \geq 7\%$, se puede el efluente se puede recolectar por métodos de paleado mientras que, para $ST\% < 7\%$ se requiere de bombeado.

Para hacer una primera aproximación de las concentraciones objetivos que favorecen a la generación neta de gas metano, se calcula el promedio de generación neta promedio utilizando un rango de temperaturas desde los 15°C a los 60°C . Este cálculo ya considera los gastos energéticos requeridos para el bombeo, para calentar el efluente y para comprimir el gas metano generado, utilizando como única fuente de energía el propio gas metano. En la figura 4.4.2-1 se grafican dichos resultados.

El salto energético que se produce entre una concentración de sólidos del 5% al 7% es de aproximadamente el 80%. Sumado esto a que una mayor de concentración de sólidos implica una disminución del volumen del biodigestor y, por ende, una menor inversión inicial en infraestructura, se procede a optar por un valor mínimo de $ST\% = 7\%$.

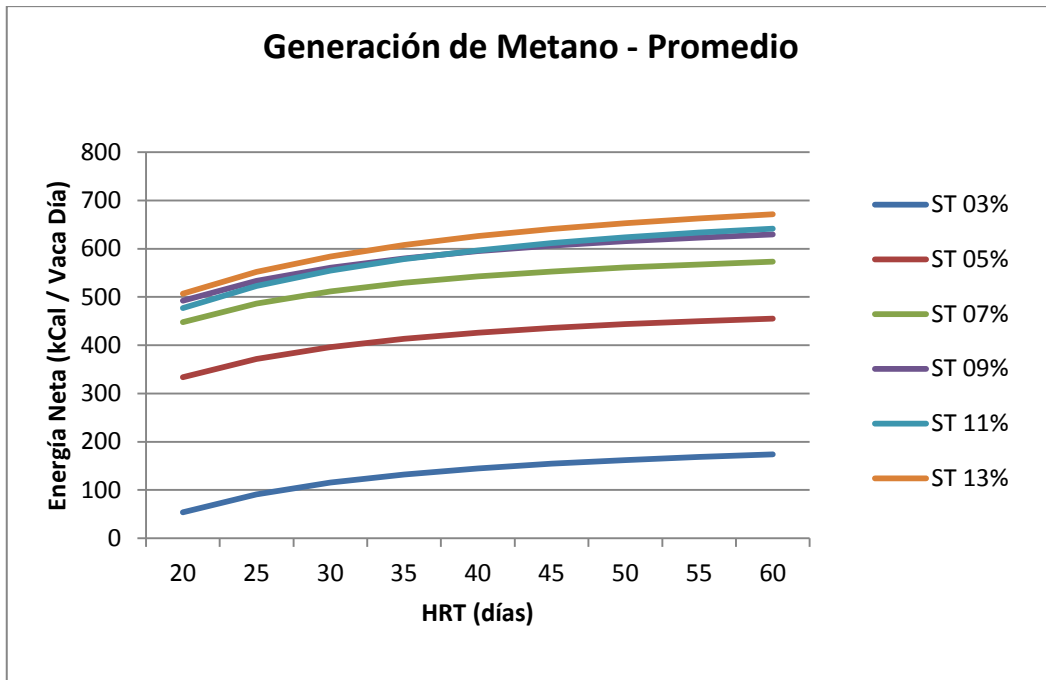


Figura 4.4.2-1: Generación promedio de gas metano. T°C desde 15°C a 60°C.

4.4.3. Temperatura de funcionamiento del biodigestor

Si bien el rango de temperatura de funcionamiento para este tipo de procesos es $15^{\circ}C \leq T \leq 60^{\circ}C$ [Nijaguna, 2006]. Sin embargo, al evaluar el promedio de generación para todos los HRT posibles, se puede establecer los máximos rondan entre $20^{\circ}C \leq T \leq 45^{\circ}C$. Al partir desde una temperatura de 15°C, la adición de calor genera una mayor actividad de las bacterias. Sin embargo, a partir de los 40°C el diferencial de gasto energético destinado a calentar los residuos no se ve reflejado en un incremento en la generación de gas metano suficiente como para generar un balance positivo de energía y justificar así la utilización de temperaturas más altas (figura 4.4.3-1).

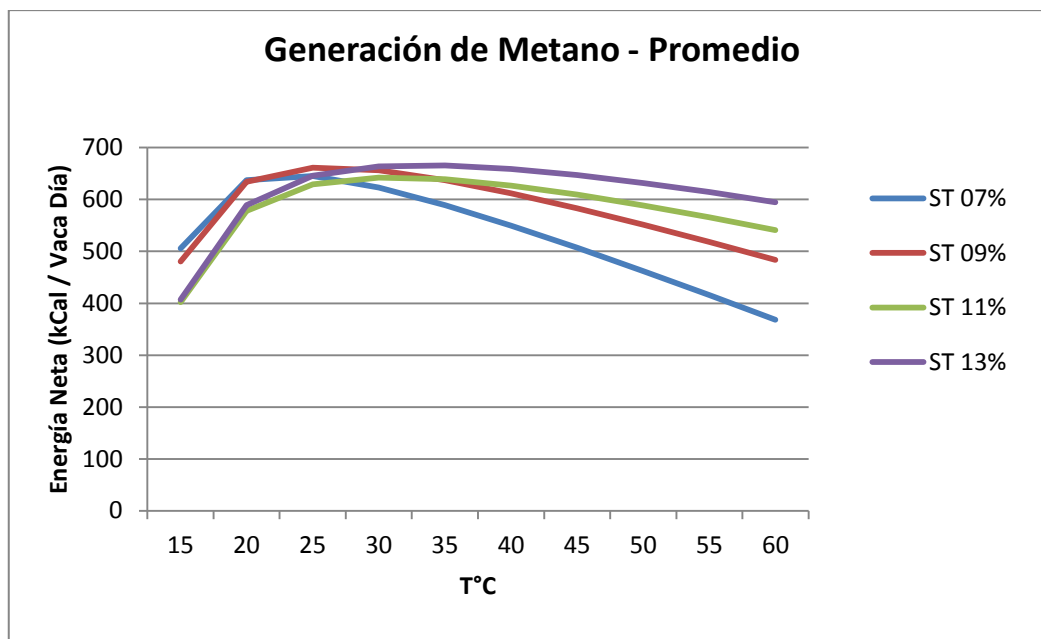


Figura 4.4.3-1: Generación promedio de metano. HRT desde 20 hasta 60 días.

Incluso para condiciones extremas de diseño donde $HRT = 20días$ (el biodigestor de menor tamaño posible para un valor dado de sólidos totales – ver fórmula 4.2-8), sigue sin ser recomendables temperaturas mayores a los 45°C (figura 4.4.3-2)

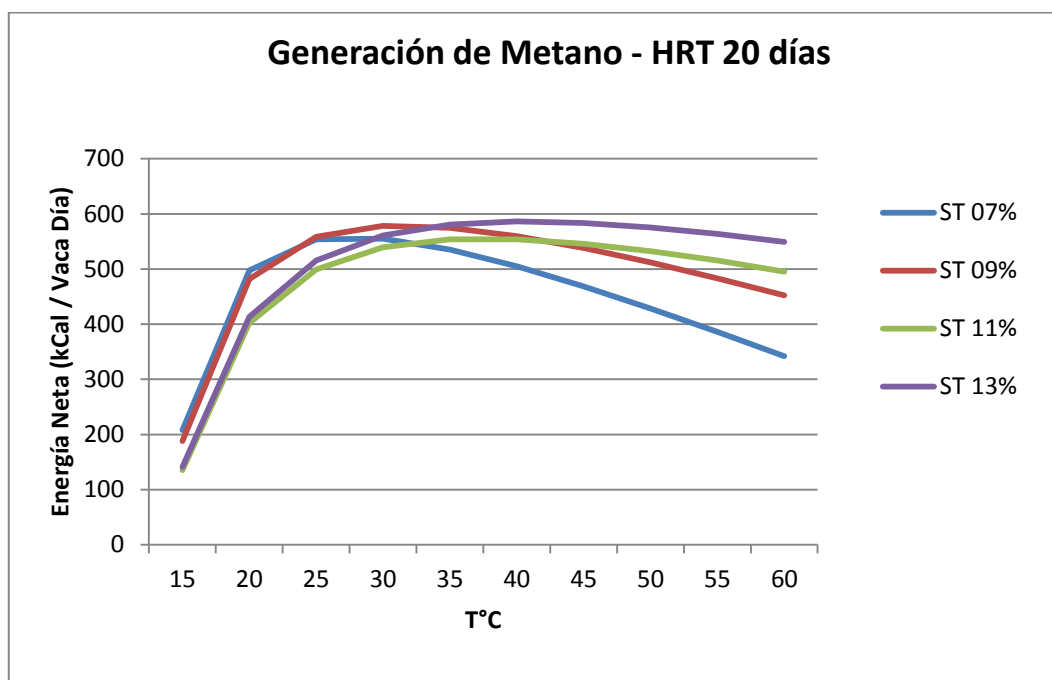


Figura 4.4.3-2: Generación neta de gas metano. HRT = 20 días.

4.4.4. Tiempo de retención hidráulico

Para que cualquiera de los biodigestores (complete mix o plugflow) funcione correctamente, es necesario un tiempo mínimo de retención para permitir la colonización y la reproducción de bacterias. Debido a esto, se considera $HRT \geq 20 \text{ días}$ para que cualquiera de los dos tipos de biodigestores (complete mix o plugflow) funcione correctamente [Roos *et al.*, 2004].

Observando la variación de generación en función del tiempo de retención hidráulica promedio para distintos valores de concentración de sólidos totales, se puede distinguir una cierta tendencia a un aumento de la producción de gas metano por vaca a medida que el tiempo de retención hidráulico se incrementa (figura 4.4.4-1). Sin embargo, este dato no se puede utilizar como elemento concluyente para generar una limitante de diseño ya que los gastos de inversión en el tamaño del tanque biodigestor pueden dar como consecuencia un flujo de fondos que no es el óptimo ya que el tamaño del biodigestor es proporcional (aunque no linealmente) al tiempo de retención hidráulico. Por ende, se descarta este tipo de análisis de limitantes de diseño y se toma un rango de días de retención general para la construcción del biodigestor $20 \text{ días} \leq HRT \leq 60 \text{ días}$.

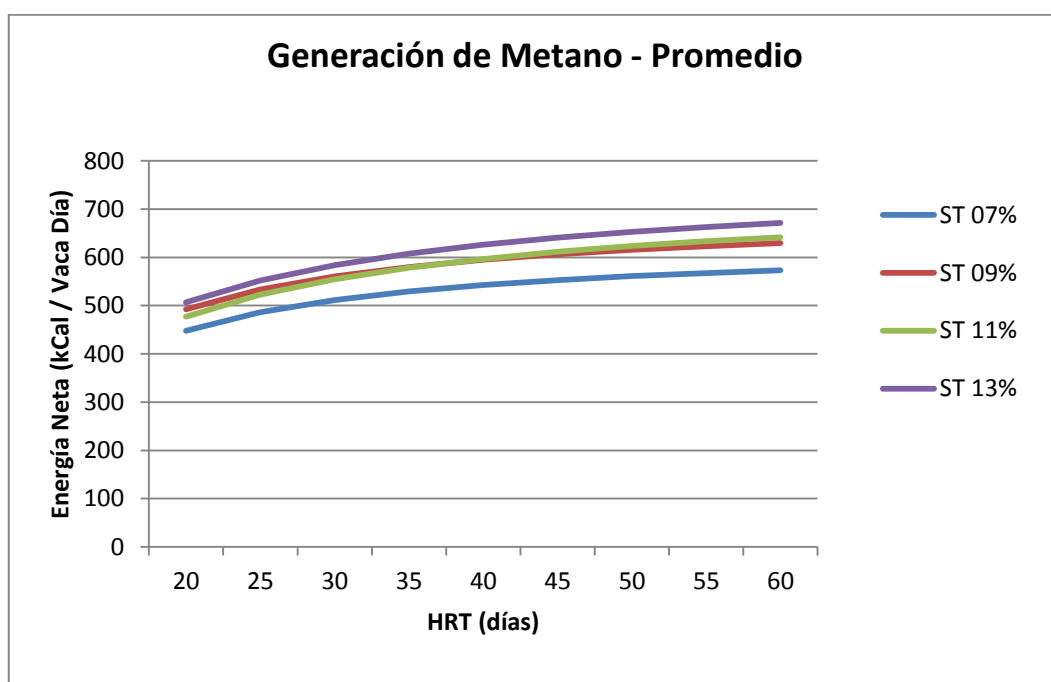


Figura 4.4.4-1: Generación de gas metano en función del HRT.

Sin embargo, se debe considerar que el HRT determina el intervalo de tiempo entre el comienzo del funcionamiento del biodigestor y la generación de gas

metano que se planteó por diseño. En este sentido, se espera que, dado que, por diseño, se requiere de un tiempo igual al tiempo de retención hidráulico para llenar el biodigestor y, a su vez, se requiere de un tiempo igual al tiempo de retención hidráulico para comenzar a generar metano al mismo ritmo establecido por diseño, se considera que desde el momento en que comienza a funcionar el biodigestor hasta el momento en que comienza a generar metano al ritmo establecido por cálculo, transcurren un total de $2 \times HRT$ días.

4.5. PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA INVERSIÓN

4.5.1. Tanque de Mezcla

Es el tanque en donde se recolectan los residuos para llevarlos a la concentración objetivo. La dimensión del mismo debe ser suficiente como para poder albergar al menos un día de recolección en la concentración objetivo. El volumen del tanque de mezcla V_{Mezcla} [litros] se puede expresar mediante la fórmula 4.5.1-1.

$$V_{Mezcla} = E_e \times n_{Mezcla} \quad (4.5.1-1)$$

Donde E_e es el flujo diario de efluente $\left[\frac{\text{Litros}}{\text{día}} \right]$ y n_{Mezcla} es la cantidad de días de efluente que puede almacenar el tanque.

4.5.2. Bomba de Agua

Este artefacto es necesario para poder llegar a la concentración objetivo ya que, para todos los casos, es necesario agregar agua debido a que la concentración de sólidos en el excremento vacuno tal como es excretado no permite el normal funcionamiento del biodigestor, sino que se requiere de concentraciones menores. La dimensión de la bomba se calcula en función al agua total a adicionar por día para llegar a la concentración objetivo y en función al tamaño del ganado, aunque una primera aproximación se puede obtener mediante E_e .

4.5.3. Tanque de Biodigestión

Es el tanque en donde se produce la biodigestión. El tamaño del mismo está directamente ligado a los días de reposo establecidos para que se lleve la biodigestión a cabo, a la concentración objetivo que se quiere llegar y al tamaño del ganado vacuno. V_d se expresa mediante la fórmula (4.5.3-1).

$$V_d = E_e \times HRT \quad (4.5.3-1)$$

4.5.4. Intercambiador de Calor

Elemento necesario en caso de precisar una temperatura mayor a la de napa y la de medio ambiente para el proceso de biodigestión. La dimensión del intercambiador de calor está determinada por el flujo de calor a transmitir $E[Q_b]$.

4.5.5. Compresor

Se utiliza para poder comprimir los gases generados por el proceso de biodigestión para albergarlos en un volumen menor dentro de un tanque de gas. El volumen a comprimir del tanque de gas está determinado por el volumen de metano generado por día V_{CH_4} .

4.5.6. Tanque de Gas

El tanque de gas es el elemento necesario para poder depositar el gas producido.

$$V_T = V_{CH_4} \times n_{tanque} \quad (4.5.3-1)$$

Donde n_{tanque} es la cantidad de días de almacenamiento de gas para el cual se quiere dimensionar el tanque. Se establece un valor de diseño de $n_{tanque} = 10días$.

4.5.7. Separador de sólidos

Se utiliza para separar los sólidos del efluente para poder darle así una utilización de los mismos como fertilizante. El volumen del tanque de separación de sólidos viene dado por la fórmula 4.5.7-1.

$$V_{Separador} = E_e \times n_{Separador} \quad (4.5.7-1)$$

Donde $n_{Separador}$ es la cantidad de días de efluente para las que el separador está dimensionado. Para evitar congestionamientos del flujo, se establece como $n_{Separador} = 2 \text{ días}$.

4.6. PRINCIPALES GANANCIAS

4.6.1. Generación de Gas Metano

Las ganancias que implican la generación de gas metano se pueden calcular mediante el precio del gas metano en la actualidad. Sin embargo, no debe de considerarse el valor nominal del precio de línea para estos casos debido a que el gas no se distribuye por línea para muchos de los pueblos del interior de Argentina. Para estos fines, se debe considerar un precio del gas de garrafa cuyo valor llega hasta el 700% del valor de línea. Para fines de simulación se establece un precio equivalente el 300% de línea (tabla 4.6.1-1).

	Gas Línea	Gas Garrafa	UMB
Capacidad Calorífica	9.340	9.340	Kcal/m ³
Precio	0,69	2,07	AR\$/m ³
Precio	0,000074	0,000222	AR\$/Kcal

Tabla 4.6.1-1: Precios del gas

4.6.2. Generación de Energía Eléctrica

A fines analíticos, se asume que siempre se tendrá acceso a una red de tendido eléctrico y que el ahorro debido a la generación de energía eléctrica (en caso de que aplique) será calculado con el precio de energía eléctrica de línea (tabla 4.6.1-2).

	Línea	UMB
Costo Electricidad	0,2061	AR\$/kWh

Tabla 4.6.1-2: precio de energía eléctrica

4.6.3. Fertilizantes

Para hacer un análisis económico de las ganancias obtenidas a la hora de utilizar parte del efluente del material del proceso de biodigestión como fertilizante, lo más conveniente sería comparar los beneficios de utilizar este efluente contra los de usar el excremento sin tratar y traducir a éstos en términos de fertilizante como para poder obtener un valor económico. Debido a que el estudio efectivo de los mismos excede los alcances de este estudio, se procede a hacer una estimación.

Con el objeto de alinearse a los estudios existentes, se asume que la eficiencia del nitrógeno es aproximadamente un 20% mayor en el efluente ya tratado que en el excremento sin tratar. Este valor se puede traducir en términos de nitrógeno al analizar el estiércol vacuno en lo que respecta a fertilizantes, tal como figura desglosado en su totalidad en la tabla 4.6.3-1.

		Concentración	Pérdidas durante Exposición	Concentración	Estiercol	Masa Componente
Componente	Fórmula	(kg Componente / kg Estiercol)	%	(kg Componente / kg Estiercol)	(kg/vaca día)	(kg/vaca día)
Nitrógeno	N	0,50%	60%	0,20%	3	0,0060
Óxido de Fósforo	P2O5	0,20%	40%	0,12%	3	0,0036
Óxido de Potasio	K2O	0,50%	40%	0,30%	3	0,0090

Tabla 4.6.3-1: Masa de fertilizantes obtenidos por el excremento vacuno por vaca por día.

Asumiendo que un incremento porcentual en la efectividad del nitrógeno equivale al mismo incremento porcentual en la concentración de nitrógeno, se pueden calcular las concentraciones de fertilizantes promedio para el efluente de un biodigestor (tabla 4.6.3-2).

Componente	Fórmula	Masa de Componente	
		Efluente	Excremento
		(kg/vaca día)	(kg/vaca día)
Nitrógeno	N	0,0072	0,0060
Óxido de Fósforo	P2O5	0,0036	0,0036
Óxido de Potasio	K2O	0,0090	0,0090

Tabla 4.6.3-2: Masa de fertilizantes obtenidos por por vaca por día para el efluente y el excremento.

Para evaluar el ahorro en términos de fertilizantes, se puede comparar los costos de los fertilizantes más comunes que se utilizan en el agro (tabla 4.6.3-3).

Fertilizante químico	Componente	Fórmula	Concentraciones (%)	Precio	
				US\$/ton	AR\$/ton
Urea perlada (46-0-0)	Nitrógeno	N	46,00%	561	2356,2
Superfosfato (0-48.5-0)	Óxido de Fósforo	P2O5	48,50%	495	2079
Cloruro de Potasio (0-0-60)	Óxido de Potasio	K2O	60,00%	550	2310

Tabla 4.6.3-3: Precio de los fertilizantes.

De esta manera, se puede calcular el beneficio económico de la utilización del efluente (4.6.3-4).

Componente	Fórmula	Precio	UMB	Masa de Componente			AR\$
				Efluente	Excremento	Delta	
				(kg/vaca día)	(kg/vaca día)	(kg/vaca día)	
Nitrógeno	N	5.122	AR\$/ton	0,0072	0,0060	0,0012	0,006
Óxido de Fósforo	P2O5	4.287	AR\$/ton	0,0036	0,0036	-	-
Óxido de Potasio	K2O	3.850	AR\$/ton	0,0090	0,0090	-	-
Total ahorro (AR\$/vaca día)							0,006

Tabla 4.6.3-4:Ahorro total por vaca.

En promedio, se puede afirmar que la biodigestión del excremento equivale en términos de fertilizante a un ahorro de $0,006AR\$/vaca \cdot día$. Este valor se puede escalar para poder calcular el ahorro generado para los distintos tipos de tamaño.

4.6.4. Beneficios Legales

La reglamentación de la Ley de Biocombustibles (Ley 26.093) establece que tanto para aquellos que produzcan biocombustibles para autoconsumo como para aquellos que lo ahcen con fines comerciales, se puede contar con una devolución anticipada del IVA o una devolución anticipada del impuesto a las ganancias, siendo estas dos opciones excluyentes (ver anexos).

4.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA SEGÚN ESCALA

A continuación se plantean tres tamaños de escalas distintas; una para el hogar, otra para los tambos y una tercera para un feedlot. La función es poder resolver estas tres situaciones utilizando como variables

$$7\% \leq ST\% \leq 13\%$$

$$20^{\circ}C \leq T \leq 45^{\circ}C$$

$$20días \leq HRT \leq 60días$$

N vacasa determinar (si aplica)

4.7.1. Escala1: Hogar

En este caso, el planteo consiste en dimensionar el tamaño del ganado así como las tres variables restantes de manera tal de poder llegar a abastecer todos los requerimientos energéticos que se tienen en un hogar promedio. Los consumos se pueden dividir en consumos de gas (tabla 4.7.1-1) y consumos de electricidad (tabla 4.7.1-2).

Artefacto	Potencia (kcal/h)	Uso Promedio Diario (h)	Consumo de Gas Natural (kcal/mes)
Calefacción			
Estufa Tiro Balanceado (p/ambiente de 5x4x2,5 m)	2.500	1	75.000
Agua caliente			
Termotanque 110 l	7.200	6	1.296.000
Cocción			
Quemadores de hornalla chicos	1.000	1	30.000
Quemadores de hornalla medianos	1.300	1	39.000
Quemadores de horno	3.000	1	90.000
Total (KCal/Mes)			1.530.000

Tabla 4.7.1-1: consumo de gas promedio.

Artefacto	Potencia (Watts)	Uso Promedio Diario (h)	Energía Mensual Consumida (kWh)
Iluminación			
10 Lámparas incandescentes de 40 W	400	8	96
10 Lámparas Fluorescente Compacta de 15 W	150	8	36
Grandes artefactos			
Heladera c/Freezer (360 l)	200	12	72
Horno Microondas	800	1	24
Lavarropas Automático Carga de 5 kg.	500	1	15
Climatización			
Aire Acondicionado de 2200 frigorías (2200 kcal/h)	1.350	2	81
Ventilador Portátil	90	2	5
Ventilador de Techo	60	6	11
Pequeños artefactos			
Lustradora/Aspiradora	800	1	24
Cafetera	900	1	27
Plancha	1.000	1	30
Multi Procesador de Alimentos	500	1	8
Secador de Pelo	500	1	8
Equipos electrónicos			
Computadora Personal	150	4	18
Impresora	50	1	1
Impresora Láser	400	1	6
Monitor	250	4	30
Televisor Color	100	4	12
Video Grabadora (VCR)	100	2	6
Equipo de Audio	80	2	5
Total (KWh/Mes)			514

Tabla 4.7.1-2: consumo eléctrico promedio del hogar.

Los resultados que mejor ajustaron a este diseño se presentan en la tabla 4.7.1-3

Variable	Valor	UMB
HRT	35	días
T°C	30	°C
%TS	11%	(kg TS / kg Efluente)

Elemento	Capacidad	UMB
Agua a Bombear	448,56	Lts/Día
Tamaño Tanque de Mezcla	0,90	m3
Tamaño Biodigestor	15,70	m3
Tanque de Gas Metano	1,21	m3
Tanque Separador	0,90	m3

Generación	Capacidad	UMB
Generación Neta de Gas Metano	9,84	m3/día
Energía eléctrica consumida	-	KWh/día

Consumo	Consumo	UMB
Gas Hogar	1.530.000,00	kCal/mes
Eléctrico Hogar	513,75	kWh/mes

Tabla 4.7.1-3: Variables más representativas del proceso – Biodigestor para hogar.

La inversión total se presenta en la tabla 4.7.1-4

Inversión	Dimensión	Unidades	Precio	Moneda
Bomba		6 Lts/Hora	215	AR\$
Compresores		100 Atm.	5.000	AR\$
Generador Electrico a Gas		1 KW	1.517	AR\$
Tanque Mezcla		1 m3	897	AR\$
Biodigestor		16 m3	16.734	AR\$
Tanque de Gas		1 m3	4.395	AR\$
Intercambiador de Calor		443 Kcal/Hora	1.019	AR\$
Tanque Separador		1 m3	2.889	AR\$
Total Inversión			29.776,04	AR\$

Tabla 4.7.1-4: Detalle de la inversión – Biodigestor para hogar

Los ingresos totales en un mes tipo se presentan en la tabla 4.7.1-4.

Detalle	Ganancia	UMB
Fertilizante	22	AR\$/Mes
Gas	340	AR\$/Mes
Electricidad	99	AR\$/Mes
Total	461	AR\$/Mes

Tabla 4.7.1-5: Ingresos totales por mes – Biodigestor para hogar.

Bajo este flujo de fondos, la inversión se recupera en 5 años aproximadamente.

4.7.2. Escala 2: Tambos

A la hora de analizar la posibilidad de instalar un biodigestor en un tambo, resulta apropiado establecer un tamaño del mismo que se aproxime a la situación actual de tambos en la República Argentina. La distribución de tambos por cuencas así como el tamaño de tambos promedio de Argentina se presenta en la tabla 4.7.2-1.

Cuenca	Cantidad de Vacas de Ordeño
Entre Ríos	71
Santa Fé - Córdoba	114
Villa María	136
Abasto - Bs. As.	140
Oeste - Bs. As.	120
Promedio General	127

Tabla 4.7.2-1: tamaño de tambos en Argentina.[Gambuzziet al., 2004]

Del total de tambos en Argentina, aproximadamente el 64% de ellos arriendan la tierra. Dentro de este grupo, aproximadamente 50% de ellos son dueños de la tierra que trabajan [Chimizet al., 2009]. Una vaca, según un tambo promedio, consume 14Kwh por vaca de ordeño por mes. En este caso el planteo es dimensionar el biodigestor de manera tal que, de instalarlo en un tambo promedio, este sea capaz de producir un sistema autosustentable. El tamaño dimensionado es para un tambo de 120 vacas de ordeño. Los resultados que mejor ajustaron a este diseño se presentan en la tabla 4.7.2-1.

Tamaño del ganado	120	Vacas
Variable	Valor	UMB
HRT	50 días	
T°C	30 °C	
%TS	12%	(kg TS / kg Efluente)

Elemento	Capacidad	UMB
Agua a Bombear	406,56	Lts/Día
Tamaño Tanque de Mezcla	0,81	m3
Tamaño Biodigestor	20,33	m3
Tanque de Gas Metano	1,28	m3
Tanque Separador	0,81	m3

Elemento	Capacidad	UMB
Generación Neta de Gas Metano	10,63	m3/día
Energía eléctrica consumida	-	KWh/día

Consumo	Consumo	UMB
Gas Hogar	-	kCal/mes
Eléctrico Hogar	-	kWh/mes
Tambo	1.680,00	kWh/Mes

Tabla 4.7.2-2: Variables más representativas del proceso – Biodigestor para tambo.

La inversión total se presenta en la tabla 4.7.2-3

Inversión	Dimensión	Unidades	Precio	Moneda
Bomba		4 Lts/Hora	211	AR\$
Compresores		100 Atm.	5.000	AR\$
Generador Electrico a Gas		1 KW	1.603	AR\$
Tanque Mezcla		1 m3	813	AR\$
Biodigestor		20 m3	19.603	AR\$
Tanque de Gas		1 m3	4.637	AR\$
Intercambiador de Calor		393 Kcal/Hora	1.017	AR\$
Tanque Separador		1 m3	2.889	AR\$
Total Inversión			32.883,75	AR\$

Tabla 4.7.2-3: Detalle de la inversión – Biodigestor para tambo.

Los ingresos totales se presentan en la tabla 4.7.2-4.

Detalle	Ganancia	UMB
Fertilizante	22	AR\$/Mes
Electricidad	346	AR\$/Mes
Total	368	AR\$/Mes

Tabla 4.7.2-4: Ingresos totales por mes – Biodigestor para tambo.

Bajo este flujo de fondos, la inversión se recupera en 7 años aproximadamente.

4.7.3. Escala 3: Feedlots

Considerando un tamaño de feedlot de 1000 vacas, se procede a hacer la misma simulación con la función objetivo de maximizar el flujo de fondos.

Tamaño del ganado	1000	Vacas
--------------------------	------	-------

Variable	Valor	UMB
HRT	20	días
T°C	30	°C
%TS	12%	(kg TS / kg Efluente)

Elemento	Capacidad	UMB
Agua a Bombear	3.388,00	Lts/Día
Tamaño Tanque de Mezcla	6,78	m3
Tamaño Biodigestor	67,76	m3
Tanque de Gas Metano	8,71	m3
Tanque Separador	6,78	m3

Elemento	Capacidad	UMB
Generación Neta de Gas Metano	70,75	m3/día

Tabla 4.7.3-1: Variables más representativas – Biodigestor para feedlot.

La inversión total se presenta en la tabla 4.7.3-2.

Inversión	Dimensión	Unidades	Precio	Moneda
Bomba	35	Lts/Hora	289	AR\$
Compresores	100	Atm.	5.000	AR\$
Generador Electrico a Gas	4	KW	10.933	AR\$
Tanque Mezcla	7	m3	13.799	AR\$
Biodigestor	68	m3	49.011	AR\$
Tanque de Gas	9	m3	30.450	AR\$
Intercambiador de Calor	3.274	Kcal/Hora	1.138	AR\$
Tanque Separador	1	m3	2.889	AR\$
Total Inversión			110.619,59	AR\$

Tabla 4.7.3-2: Detalle de la inversión – Biodigestor para feedlot.

Los ingresos totales se presentan en la tabla 4.7.3-3.

Detalle	Ganancia	UMB
Fertilizante	184	AR\$/Mes
Gas	3.534	AR\$/Mes
Total	3.719	AR\$/Mes

Tabla 4.7.3-3: Ingresos totales por mes – Biodigestor para feedlot.

Bajo este flujo de fondos, la inversión se recupera en 3 años.

5. IMPACTO AMBIENTAL

5.1. *Energía alternativa*

La generación de biogás mediante la biodigestión es una energía renovable y alternativa. En este sentido, la implementación de este tipo de procesos genera una disminución en el consumo de otras fuentes de energía, muchas de ellas no renovables tales como el petróleo. Haciendo un balance energético y no sólo económico, se puede concluir que, al contrastar la energía generada contra la consumida durante el proceso (tanto energía eléctrica como energía suministrada por el gas metano) el balance energético resulta positivo. Para todas las configuraciones, se obtienen por sobre las 600 Kcal/Vaca día. En un año, por cada siete vacas que se utilicen para suministrar al biodigestor durante un año, se ahorra el equivalente en energía a un barril de petróleo sin considerar los gastos energéticos inherentes a la extracción del mismo.

5.2. *Emisiones de Carbono*

Además del ahorro energético que implica la instalación de un biodigestor, se pueden encontrar diferentes características que ayudan al medio ambiente. El excremento de vaca, de no ser tratado, de forma natural genera emisiones de metano. Aproximadamente, un ganado vacuno emana un total de 0,09 metros cúbicos de metano por día (tabla 5.1-1).

Variable	Valor	UMB
B0	3,80	ft3 CH4 / lb VS
1 m3	35,31	ft3
1 kg	2,20	lb
B0	0,24	m3 CH4 / kg VS
Estiercol	3,00	Kg estiercol / vaca día
Concentración TS	0,15	kg TS / kg estiercol
Concentración VS	0,86	kg VS / kg TS
Emisión VS	0,40	kg VS / vaca
Emisión CH4	0,09	m3 CH4 / vaca día
Emisión CH4	0,06	kg CH4 / vaca día

Tabla 5.1-1: Emisiones de metano por vaca.

La instalación de un biodigestor impide que esto ocurra centralizando la generación de este gas dentro del tanque de biodigestión, ayudando así a disminuir la concentración de gas metano en el medio ambiente. El efecto

invernadero es una consecuencia directa de la concentración de distintos gases en la atmósfera.

Gas	Fórmula Química	Tiempo de Vida (años)	Potencial de calentamiento global (Global warming potential - GWP) por horizonte temporal		
			20 años	100 años	500 años
Dióxido de Carbono	CO ₂		1	1	1
Metano	CH ₄	12	72	25	8
Óxido Nitroso	N ₂ O	114	289	298	153
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	11.000	10.900	5.200
HCFC-22	CHClF ₂	12	5.160	1.810	549
Tetrafluoromeano	CF ₄	50.000	5.210	7.390	11.200
Hexafluoretano	C ₂ F ₆	10.000	8.630	12.200	18.200
Hexafluoruro de Azufre	SF ₆	3.200	16.300	22.800	32.600
Trifluoruro de Nitrógeno	NF ₃	740	12.300	17.200	20.700

Tabla 5.1-2: Valores de GWP para distintos gases.

Para una cierta masa de un gas liberado en la atmósfera, el GWP refleja la relación entre el calor que este gas atrapa y el calor que la misma masa de gas metano atraparía en el mismo horizonte temporal. Para el gas metano, un GWP de 25 en un horizonte de 100 años significa que cada gramo de metano liberado en la atmósfera absorbería 25 veces más el calor que absorbe un gramo de dióxido de carbono durante un horizonte temporal de 100 años (tabla 5.1-2).

	Horizonte temporal			UMB
	20 años	100 años	500 años	
Emisión CO ₂	4,62	1,60	0,49	kg CO ₂ / vaca día
Equivalente	2,57	0,89	0,27	m ³ CO ₂ / vaca día

Tabla 5.1-3: emisión de CO₂ equivalente.

El GWP para un gas refleja la relación entre el calor atrapado por una masa de dicho gas y el calor atrapado por el dióxido de carbono.

5.3. Reducción de contaminantes

Otro aspecto no menor es la contaminación debido a patógenos del excremento de vaca. La reducción es total ya que para este modelo el 100% del excremento es destinado a la biodigestión. La reducción de olores en estos casos es del 95%.

6. CONCLUSIÓN

La biodigestión anaeróbica resulta una alternativa económicamente viable a la hora de buscar el doble propósito de contar con un sistema de tratamiento de residuos y un establecimiento capaz de proveer energías alternativas, independientemente del uso de las misma. A su vez, se obtiene el beneficio adicional de un efluente que tiene una capacidad fertilizante mayor a la del estiércol de animal sin tratar.

La biodigestión anaeróbica en la industria ganadera debe tratarse como un proceso industrial en donde el análisis previo de las variables implicadas durante la etapa de diseño pueden optimizar la producción de gas metano. En este sentido, resulta fundamental hacer un estudio apropiado del ganado para el cual se está diseñando el biodigestor. Particularmente, es menester dimensionar el ganado en términos de volumen de excremento y calidad del mismo, de manera tal de aprovechar al máximo la homogeneidad del efluente de excremento. Como investigación futura, se recomienda hacerun estudio exhaustivo en Argentina de manera tal de poder crear una matriz de generación de metano en función de la ubicación, suelos y animales intervinientes en el proceso de biodigestión.

VARIABLES de diseño tales como la concentración de sólidos, el tiempo de retención hidráulico y la temperatura del proceso de biodigestión demostraron ser fundamentales a la hora de la elección del tipo de biodigestor y de la maximización de la producción de metano. No controlarlas adecuadamente puede resultar en una disminución o incluso la falta de generación de metano.

Al aumentar el tamaño del ganado, las economías de escala resultaronnser un factor fundamental para hacer el proceso uno más rentable.En este sentido, también es fundamental integrar el biodigestordurante la instalación de un tambo o un feedlot de manera tal de disminuir la inversión inicial y en consecuencia recuperarla en menos tiempo. Y, por sobre todo, es indiscutible la conveniencia de invertir tiempo y recursos en un análisis previo a la instalación del biodigestor.

7. ANEXOS

Los presentes anexos son leyes que remiten a la producción de biocombustibles. Por cuestiones de extensión se limita a transcribir los artículos que atañen al beneficio de la producción de biogás.

7.1. Ley 26.093 - Biocombustibles

Definición de Biocombustibles

ARTICULO 5 - A los fines de la presente ley, se entiende por biocombustibles al bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación.

Beneficios Promocionales

ARTICULO 15...

1.- En lo referente al Impuesto al Valor Agregado y al Impuesto a las Ganancias, será de aplicación el tratamiento dispensado por la Ley N° 25.924 y sus normas reglamentarias, a la adquisición de bienes de capital o la realización de obras de infraestructura correspondientes al proyecto respectivo, por el tiempo de vigencia del presente régimen.

2.- Los bienes afectados a los proyectos aprobados por la autoridad de aplicación, no integrarán la base de imposición del Impuesto a la Ganancia Mínima Presunta establecido por la Ley N° 25.063, o el que en el futuro lo complete, modifique o sustituya, a partir de la fecha de aprobación del proyecto respectivo y hasta el tercer ejercicio cerrado, inclusive, con posterioridad a la fecha de puesta en marcha.

...

6.- La Subsecretaría de Pequeña y Mediana Empresa promoverá la adquisición de bienes de capital por parte de las pequeñas y medianas empresas destinados a la producción de biocombustibles. A tal fin elaborará programa específicos

que contemplen el equilibrio regional y previera los recursos presupuestarios correspondientes.

7.2. Reglamentación de la Ley de Biocombustibles

Reglamentación de la Ley de Biocombustibles

Art. 20. A los fines del Artículo 15 de la Ley N° 26.093, se establecen las siguientes disposiciones:

a) De conformidad a lo establecido en el Artículo 15, inciso 1 de la citada ley, los sujetos titulares de proyectos aprobados en el marco de las disposiciones de esta ley podrán obtener la devolución anticipada del Impuesto al Valor Agregado (IVA) correspondiente a los bienes nuevos amortizables -excepto automóviles-, u obras de infraestructura -excepto obras civiles- incluidos en el proyecto o, alternativamente, practicar en el impuesto a las ganancias la amortización acelerada de los mismos, no pudiendo acceder a los DOS (2) tratamientos por un mismo proyecto.

I. Devolución anticipada del Impuesto al Valor Agregado (IVA):

El Impuesto al Valor Agregado (IVA) que por la compra, fabricación, elaboración o importación definitiva de bienes de capital o la realización de obras de infraestructura les hubiera sido facturado a los responsables del gravamen, luego de transcurridos como mínimo TRES (3) períodos fiscales contados a partir de aquél en el que se hayan realizado las respectivas inversiones, les será acreditado contra otros impuestos a cargo de la ADMINISTRACION FEDERAL DE INGRESOS PUBLICOS, entidad autárquica en el ámbito del MINISTERIO DE ECONOMIA Y PRODUCCION o, en su defecto, les será devuelto, en ambos casos en el plazo estipulado en el acto de aprobación del proyecto y en las condiciones, con las garantías que al respecto establezca la ADMINISTRACION FEDERAL DE INGRESOS PUBLICOS. Dicha acreditación o devolución procederá en la medida en que el importe de las mismas no haya debido ser absorbido por los respectivos débitos fiscales originados por el desarrollo del proyecto.

1. A tales fines se considerarán inversiones realizadas a aquéllas que correspondan a erogaciones de fondos efectuadas a partir de la fecha de aprobación del proyecto, de conformidad a los plazos establecidos en el mismo.

2. Cuando los bienes a los que se refiere el presente punto se adquieran en los términos y condiciones establecidos por la Ley N° 25.248, los créditos fiscales correspondientes a los cánones y a la opción de compra sólo podrán computarse los efectos de este Régimen luego de transcurridos como mínimo TRES (3) períodos fiscales contados a partir de aquél en que se haya ejercido la citada opción.

3. No podrá realizarse la acreditación prevista en este Régimen contra obligaciones derivadas de la responsabilidad sustitutiva o solidaria de los contribuyentes por deudas de terceros, o de su actuación como agentes de

retención o depercepción. Tampoco será aplicable la referida acreditación contra gravámenes con destino exclusivo al financiamiento de fondos con afectación específica.

4. El Impuesto al Valor Agregado (IVA) correspondiente a las inversiones a que hace referencia el punto 1 se imputará contra los débitos fiscales una vez computados los restantes créditos fiscales relacionados con la actividad gravada.

5. No procederá la acreditación o devolución a que se refiere el presente apartado, según corresponda, cuando al momento de su solicitud los respectivos bienes de capital no integren el patrimonio de los titulares del proyecto.

II. Amortización acelerada en el Impuesto a las Ganancias:

Los sujetos titulares de proyectos promovidos en el marco de la Ley N° 26.093 por las inversiones correspondientes a dichos proyectos efectuadas con posterioridad a su aprobación y de conformidad a los plazos previstos en el mismo, podrán optar por practicar las respectivas amortizaciones a partir del período fiscal de habilitación del bien, de acuerdo con las normas previstas en el Artículo 84 de la Ley de Impuesto a las Ganancias T.O. 1997 y sus modificaciones, o conforme al Régimen que se establece a continuación:

1. Para inversiones realizadas durante los primeros DOCE (12) meses inmediatos posteriores a la fecha de aprobación del proyecto:

1.1. En bienes muebles amortizables adquiridos, elaborados, fabricados o importados en dicho período: como mínimo en TRES (3) cuotas anuales, iguales y consecutivas.

1.2. En obras de infraestructura iniciadas en dicho período: como mínimo en la cantidad de cuotas anuales, iguales y consecutivas que surja de considerar su vida útil reducida al CINCUENTA POR CIENTO (50%) de la estimada.

2. Para inversiones realizadas durante los segundos DOCE (12) meses inmediatos posteriores a la fecha indicada en el punto 1:

2.1. En bienes muebles amortizables adquiridos, elaborados, fabricados o importados en dicho período: como mínimo en CUATRO (4) cuotas anuales, iguales y consecutivas.

2.2. En obras de infraestructura iniciadas en dicho período: como mínimo en la cantidad de cuotas anuales, iguales y consecutivas que surja de considerar su vida útil reducida al SESENTA POR CIENTO (60%) de la estimada.

3. Para inversiones realizadas durante los terceros DOCE (12) meses inmediatos posteriores a la fecha indicada en el punto 2:

3.1. En bienes muebles amortizables adquiridos, elaborados, fabricados o importados en dicho período: como mínimo en CINCO (5) cuotas anuales, iguales y consecutivas.

3.2. En obras de infraestructura iniciadas en dicho período: como mínimo en la cantidad de cuotas anuales, iguales y consecutivas que surja de considerar su vida útil reducida al SETENTA POR CIENTO (70%) de la estimada. Cuando se trate de operaciones que den derecho a la opción prevista en el Artículo 67 de la Ley de Impuesto a las Ganancias T.O. 1997 y sus modificaciones, la amortización especial establecida en el presente apartado deberá practicarse sobre el costo determinado de acuerdo con lo dispuesto en la referida norma legal. Si la adquisición y la venta se realizaran en ejercicios fiscales diferentes, la amortización eventualmente computada en exceso deberá reintegrarse en el balance impositivo correspondiente a dicha enajenación. El tratamiento especial previsto en el presente apartado queda sujeto a la condición de que los bienes adquiridos permanezcan en el patrimonio del titular del proyecto de que se trate durante TRES (3) años contados a partir de la fecha de habilitación del bien. De no cumplirse esta condición, corresponderá rectificar las declaraciones juradas presentadas e ingresar las diferencias de impuesto resultantes con más sus intereses, salvo en el supuesto previsto en el párrafo siguiente. No se producirá la caducidad del tratamiento señalada precedentemente en el caso de reemplazo de bienes que hayan gozado de la franquicia, en tanto el monto invertido en la reposición sea igual o mayor al obtenido por su venta. Cuando el importe de la nueva adquisición fuer menor al obtenido en la venta, la proporción de las amortizaciones computadas que en virtud del importe invertido no se encuentre alcanzada por el Régimen tendrá el tratamiento indicado en el párrafo anterior.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Chau, L. H. 1998. Biodigester effluent versus manure from pigs or cattle as fertilizer for production of cassava foliage (*Manihotesculenta*). Institute of Agricultural Sciences, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Chimiz, J.; Gambuzzi, E. L. 2009. Recientes cambios y posibles rumbos tecnológicos del tambo argentino. INTA. Santa Fé. Argentina.
- Droste, R.L. 1997. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment. Wiley&Sons. Estados Unidos.
- Gambuzzi, E.L., Zehnder R., Chimicz J. 2004. Análisis de sistemas de la producción lechera. INTA. Santa Fé. Argentina.
- Hashimoto, A.G. 1982. Methane from cattle waste: effects of temperature, hydraulic retention time and influent substrate concentration of the kinetic paramter (K). Biotechnology and Bioengineering. Roman L. Hruska U.S. Meat Animal Research Center, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Clay Center, Nebraska. Estados Unidos.
- Hilbert, A.; Jorge, A. M. 2003. Manual para la producción de Biogás. Instituto de Ingeniería Rural , INTA. Buenos Aires. Argentina.
- Nally, D.; Smith, S.; Hackett, F.; Mooney, H. 2003. Anerobic Digestion: Industrial Application.
- Nijuana, B.T., 2006. Biogas Technology. New Age International.
- Ortenblad, H. 2003. The use of digested slurry within agriculture.
- Pondomingo, A. J. 2003. Gestión ambiental en el feedlot. INTA Anguil. La Pampa. Argentina.
- Roos, K. F.; Martin, J. B.; Moser, M. A. 2004. AgSTAR Handbook. Environmental Protection Agency. Nueva York. Estados Unidos.
- UADE. Evaluación del Poder de Mercado en el Sector Lácteo. Centro de Estudios Económicos de la Regulación