PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

# APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTORES A UN FEEDLOT. ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CANTIDAD DE CABEZAS DENTRO DEL ESTABLECIMIENTO


Autores

Raffo, Santiago Legajo 50719

Zava, Marco Octavio Legajo 50486

Docente Guía

Juan Marcelo Lezama


2014

# Resumen ejecutivo

Hoy en día, la producción de carne es una de las actividades productivas más importantes para la economía del país, siendo los sistemas de engorde a corral (más conocidos como “feedlots”) los más utilizados para llevarla a cabo. Este sistema productivo aporta grandes ventajas al negocio en comparación con el engorde tradicional a base de pasturas pero, por otro lado, el mismo lleva inevitablemente a la producción de grandes cantidades de desechos orgánicos, los cuales en la mayoría de los casos son desechados en una laguna cercana, o simplemente se los deja acumular en el lugar donde se realiza el engorde. Estos desechos no sólo son perjudiciales para el medio ambiente, sino que la forma en que se los desecha representa un desaprovechamiento de una importante cantidad de energía.

Este proyecto analiza la posibilidad de la aplicación de la tecnología de biodigestores a los sistemas de engorde a corral, haciendo foco en la conveniencia de la aplicación según el nivel de actividad de cada feedlot. De esta manera, se obtendrá una relación entre ahorros producidos y cantidad de cabezas a engordar en el feedlot, con lo cual los productores tendrán a disposición una herramienta que les permita realizar una primera aproximación sobre la conveniencia de la aplicación de esta tecnología a su establecimiento. El proyecto no sólo apunta a mejorar la rentabilidad de los productores de carne y de grano mediante los productos de la biodigestión, sino que también incentiva la promoción de esta tecnología que puede llevar a reducir en gran medida la contaminación ambiental.

Por último, se analizarán casos de estudio, en los cuales se aplicará lo desarrollado a lo largo del documento.

# Tecnología de biodigestores en establecimientos de feedlot

Santiago Raffo - Marco Octavio Zava

# Abstract

Nowadays, meat production is one of the most important productive activities for the country's economy, being feedlot systems the most commonly used to carry it out. This productive system brings major benefits to the business compared to traditional pastures based feeding systems but, on the other hand, it inevitably leads to the production of large quantities of organic waste, which in most cases are disposed in a nearby pond, or they are simply accumulated in the same place where fattening is done. These wastes are not only harmful to the environment, but the way they are disposed represents the waste of a significant amount of energy.

This project examines the possibility of the incorporation of biodigestors technology to feedlots, focusing on the convenience of the incorporation according to the activity level of each feedlot. This way, a relationship between economical savings and the capacity of the feedlot will be obtained and producers will have available a tool that will allow them to make a first approximation on the convenience of the incorporation of this technology to their feedlot. The project not only aims to improve the profitability of meat and grain producers using biodigestors, but also encourages the promotion of this technology, which can lead to greatly reduce environmental pollution.

Finally, the concepts developed throughout this document will be applied to solve case studies.

# Tecnología de biodigestores en establecimientos de feedlot

Santiago Raffo - Marco Octavio Zava

# Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi viejo y a mi hermano, mis modelos a seguir.

**S.R.**

A mi familia, y a todos los que me enseñaron a construir esta realidad.

**M.Z.**

# Tecnología de biodigestores en establecimientos de feedlot

Santiago Raffo - Marco Octavio Zava

# Contenido

1 Introducción ..... 1
1.1 Objetivos generales y específicos ..... 1
1.2 Contexto socio-cultural ..... 2
1.2.1 Problemas imperantes ..... 2
1.2.2 Potenciales soluciones ..... 2
2 Sistemas de engorde a corral ..... 5
2.1 Descripción y objetivos del feedlot: ..... 5
2.2 Motivos para su instalación: ..... 5
2.3 Características del negocio: ..... 6
2.3.1 Compra de “invernada” y venta de “gordo” ..... 6
2.3.2 Costo de alimentación y dieta ..... 7
2.3.3 Nivel de actividad ..... 8
2.3.4 Localización del establecimiento ..... 8
2.3.5 Otros factores a tener en cuenta ..... 10
2.4 Requisitos legales para la instalación de un feedlot ..... 11
2.5 Impacto ambiental ..... 11
2.5.1 Efectos en la baja atmósfera (tropósfera) ..... 11
2.5.2 Efectos sobre los suelos ..... 12
2.5.3 Efecto sobre las propiedades del agua ..... 13
2.6 Tratamiento de suelos en un feedlot ..... 13
2.7 Tratamiento de efluentes en un feedlot ..... 14
2.8 Subproductos del feedlot: ..... 15
2.9 Anatomía del bovino: ..... 15
2.9.1 Sistema digestivo: ..... 15
2.9.2 Dieta: ..... 16
2.9.3 Desechos del bovino: ..... 16

3 El proceso de biodigestión ..... 19
3.1 Digestión aeróbica ..... 19
3.1.1 Compostaje: ..... 19
3.2 Digestión anaeróbica ..... 19
3.2.1 Etapas ..... 20
3.2.2 Parámetros básicos de control del proceso ..... 22
4 Productos del proceso de biodigestión ..... 33
4.1 Biogás ..... 33
4.1.1 Componentes ..... 33
4.1.2 Aplicaciones ..... 34
4.2 Biofertilizante ..... 37
4.2.1 Biol ..... 39
4.2.2 Biosol ..... 39
5 Los biodigestores ..... 41
5.1 Clasificación de los biodigestores ..... 41
5.1.1 Biodigestores continuos ..... 42
5.1.2 Biodigestores semicontinuos ..... 42
5.1.3 Biodigestores discontinuos o de tipo Batch ..... 42
5.2 Tipos de biodigestores ..... 44
5.2.1 Pozo séptico ..... 44
5.2.2 Biodigestor de laguna cubierta ..... 44
5.2.3 Biodigestor de domo flotante o Hindú ..... 45
5.2.4 Biodigestor de domo fijo o Chino ..... 46
5.2.5 Biodigestor de estructura flexible ..... 48
5.2.6 Biodigestores mixtos: tanque de almacenamiento de piedra y campana de polietileno ..... 49
5.2.7 Biodigestor de Mezcla Completa ..... 50
5.2.8 Biodigestor de film ..... 51
5.3 Ventajas del uso de biodigestores en establecimientos agropecuarios ..... 52

5.3.1 Utilización del biofertilizante ..... 52
5.3.2 Energía demandada y animales requeridos ..... 53
5.4 Consideraciones para definir la localización de un biodigestor ..... 55
5.5 Selección de la tecnología del biodigestor en función del nivel de producción de biogás y biofertilizante ..... 56
5.6 Biodigestor tubular de polietileno ..... 57
5.6.1 Descripción de los componentes del biodigestor ..... 57
5.6.2 Dimensionamiento del biodigestor ..... 61
5.6.3 Materiales necesarios y costos estimados ..... 65
5.6.4 Cronograma de puesta en marcha ..... 68
5.6.5 Mantenimiento del biodigestor ..... 78
5.7 Biodigestor tipo laguna cubierta con geomembrana y cubierta de PVC ..... 79
5.7.1 Descripción componentes del biodigestor ..... 79
5.7.2 Cronograma de puesta en marcha ..... 82
5.7.3 Mantenimiento del biodigestor ..... 83
6 Factores a considerar para el ahorro ..... 85
6.1 Biogás ..... 85
6.1.1 Generación de energía eléctrica: ..... 86
6.1.2 Generación de energía térmica: ..... 87
6.2 Biofertilizante ..... 88
6.2.1 Composición del biofertilizante ..... 88
6.2.2 Fertilizantes químicos ..... 90
6.2.3 Valorización de los nutrientes del biofertilizante ..... 93
7 Casos de estudio ..... 95
7.1 Introducción ..... 95
7.2 Presentación de las tecnologías disponibles ..... 96
7.3 Detalle de la inversión inicial y estructura de costos mensuales ..... 99
7.4 Presentación de las variables de control ..... 100

7.5 Performance de indicadores económicos en función de la tecnología de biodigestores empleada y los valores de las variables de control.....101
7.5.1 Baja Tecnología:.....101
7.5.2 Alta Tecnología:.....103
7.6 Análisis y conclusiones del caso de estudio.....104
7.6.1 Baja tecnología:.....104
7.6.2 Alta tecnología:.....104
8 Conclusiones.....107
9 Bibliografía.....109

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Objetivos generales y específicos

El objetivo general del proyecto consiste en la obtención de una relación que especifique los costos que se pueden ahorrar los productores de carne utilizando la tecnología de biodigestores, que varía en función del número de cabezas a engordar (nivel de actividad) en el establecimiento feedlot. Esto servirá como una guía general para que los productores tengan una idea de la conveniencia de aplicar esta tecnología a su establecimiento.

Este objetivo general se cumplirá en la medida que se cumplan los siguientes objetivos específicos:

- Dar una introducción al sistema de engorde a corral, indicando las características principales del negocio, los métodos actuales de tratamiento de efluentes y la anatomía de los bovinos.
- Analizar el proceso de biodigestión en general, para entender cómo se producen el biogás y el biofertilizante. Luego describir las características de dichos productos.
- Presentar las distintos tipos y tecnologías que existen de biodigestores, para luego categorizarlas según requerimientos de capacidad, de forma tal que el potencial usuario pueda elegir el biodigestor que considere más útil, y sepa la inversión necesaria para adoptar el mismo.
- Presentar y analizar los distintos factores que se tendrán en cuenta para el ahorro que se puede obtener a partir del uso de la tecnología de biodigestores.
- Hacer un análisis de cómo varían los factores (y por ende los ahorros) variando el número de cabezas a engordar en el establecimiento, tabulando los resultados.
- Elaborar una conclusión a partir de los resultados obtenidos del análisis de los distintos casos de estudio.

## 1.2 Contexto socio-cultural

Para conocer la práctica de la generación de energía renovable a partir de los biodigestores, es necesario abordar su respectivo contexto socio-cultural en Argentina, el cual se detalla a continuación.

### 1.2.1 Problemas imperantes

Bajos estímulos y escasa certidumbre sobre esta tecnología en los sectores productivos del país:

Esto ocurre debido a la falta de información, falta de incentivos económicos para la aplicación de sistemas sustentables y problemas en la certificación de productos diferenciados. Esto favorece una industria de combustibles que persigue solamente la rentabilidad económica (con poco interés real en cambios en los sistemas de producción), y que utiliza insumos derivados de fuentes no renovables. En los países industrializados la historia de la tecnología de biodigestión ha respondido más a motivaciones medioambientales que puramente energéticas, constituyendo un método clásico de estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias.

Crecimiento del complejo agrícola sin la promoción de desarrollos sustentables:

Actualmente el mapa agrícola se expande a zonas marginales debido al crecimiento de grandes producciones poco sustentables, en detrimento de pequeñas y medianas explotaciones. Esto se da dentro de un marco de ausencia de análisis de impacto ambiental y de una excesiva utilización de insumos químicos. A su vez, esta mejora de productividad ocurre sin el consecuente aumento en los sistemas de tratamiento de efluentes, debido a la falta de conciencia sustentable y la falta de penalización y control.

Escasa vinculación entre los sectores productivos y académicos:

Existen demoras en el flujo de información entre los sectores productivos y académicos que ralentiza avances en los sistemas productivos.

### 1.2.2 Potenciales soluciones

Aumentar el consumo de energías renovables mediante la generación de biogás, a partir de la gestión de la biomasa, facilitando el acceso a créditos públicos para

pequeños y medianos productores para producciones sustentables y otorgándoles ventajas impositivas.

Revaloración de pasivos mediante la utilización de subproductos de escaso valor comercial, entre los que se destacan los efluentes que tienen un alto costo por su eliminación, y reutilización de grandes cantidades de agua.

Producción de biofertilizantes: estos permiten una producción a bajo costo y con mejores rindes, y mantienen la conservación del suelo desde el punto de vista de fertilidad y biodiversidad.

La implementación del sistema de bonos de carbono, que es un mecanismo internacional propuesto en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones causantes del efecto invernadero, ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir $CO_2$ como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. La transacción de los bonos de carbono - un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de un bono de carbono - permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido

Difusión y promoción de la tecnología de biodigestión: vinculación con instituciones académicas, alianzas estratégicas con organismos y fundaciones y construcciones de platas piloto y de enseñanza para cursos de capacitación.

# 2 SISTEMAS DE ENGORDE A CORRAL

Como se dijo anteriormente, el principal objetivo de este estudio es brindar la posibilidad a los productores de carne que analicen la incorporación de la tecnología de los biodigestores a un sistema de engorde a corral (feedlot), de manera de que puedan aumentar sus beneficios al mismo tiempo que colaboran con el cuidado del medioambiente. Es por eso que se pasará a describir dicho sistema productivo, desarrollando las características más importantes del negocio, los requisitos legales para la instalación de un establecimiento de este tipo, los métodos más comunes del tratamiento de efluentes dentro de los mismos y la anatomía de los bovinos.

## 2.1 Descripción y objetivos del feedlot:

El sistema de engorde a corral, también conocidos como feedlot, es una actividad productiva que consiste en producir carne con animales en total confinamiento. El negocio consiste en comprar bovinos de bajo peso, engordarlos con una dieta a base de cereales y venderlos a un precio competitivo, obteniendo así un alto rendimiento económico. Es en los corrales donde a diario se les suministra alimentación completamente balanceada basada en cereales y complementos nutricionales. La misma es de alta concentración energética y digestibilidad.

Los objetivos del feedlot son:

- Obtener una alta producción de carne de calidad por animal, en el menor tiempo posible y al menor costo.
- Maximizar las ganancias de peso diaria y obtener una alta eficiencia de conversión (emplear la menor cantidad de kilogramos de alimento posible para lograr un kilogramo de carne).

## 2.2 Motivos para su instalación:

La industria “feedlotera” en el país surge como una alternativa de producción de carne, que permite integrarla al sistema agropecuario, superando determinadas limitantes del sistema pastoril (adversidades climáticas como sequías, inundaciones, períodos prolongados de heladas). Actualmente, el feedlot cobra importancia por la necesidad de reasignar las tierras fértiles a la producción de cultivos de cosecha con mayor rentabilidad

en lugar de utilizarlas para pasturas de engorde. Algunos de los otros motivos que impulsan a la instalación de este sistema son:

- Convertir granos en carne, si es económicamente rentable (negocio de oportunidad)
- Incrementar carga total del establecimiento (aprovechar la totalidad del espacio).
- Asegurar la terminación óptima de animales recriados a pasto (engorde final a base de granos).
- Mantener la calidad constante del producto exigida en el mercado gracias a una dieta balanceada y estabilizada a lo largo del engorde.
- Poder tener hacienda durante casi todo el año (mayor manejo de la permanencia del animal en el corral).
- Aspectos financieros que requieran una terminación rápida de la hacienda (mayor rotación de animales).

## 2.3 Características del negocio:

Los principales puntos que le dan sustentabilidad al negocio en el tiempo son:

1) El precio compra (del animal a engordar, o “invernada”).
2) El costo de la alimentación.
3) El precio de venta (del animal engordado, o “gordo”)
4) Cantidad de animales a engordar (nivel de actividad).
5) Localización del feedlot.

Los primeros 3 puntos están relacionados con decisiones que se toman en el día a día del negocio. Están determinados en su mayoría por el mercado, y uno debe tomar decisiones adaptándose a lo que determina el mismo. Los últimos dos puntos son decisiones que se toman al momento de la instalación del sistema productivo, y la decisión a tomar en uno de ellos influirá sensiblemente en el otro.

### 2.3.1 Compra de “invernada” y venta de “gordo”

Las compras de los terneros para el engorde así como la venta de los novillitos para la faena pueden ser realizadas por distintas vías entre las cuales se encuentran con mayor frecuencia la venta directa desde estancia, la venta a través de consignatarios, la venta en remates y ferias o las ventas en mercados concentradores. A pesar de existir diferencias entre estos modos de comercialización del ganado, los precios que se establecen para la venta y compra de animales están establecidos por el mercado. Es decir que las ventajas que se logren por obtener precios mayores en caso de la venta y menores en el caso de la compra dependerán principalmente de la situación en la que se encuentre el mercado en

el momento de realizar la transacción. Pese a esto, existen pequeñas variaciones de precios dependiendo del sistema de comercialización que se utilice, dado que en algunos casos como la venta directa a frigoríficos, se requiere de relaciones a largo plazo que permitan obtener mejores precios que a través de otros sistemas de comercialización. En conclusión, se pueden obtener pequeñas ventajas en los precios de venta dependiendo del sistema de comercialización que se utilice aunque el precio real de la carne este establecido por el mercado. En cuanto a la compra de terneros en general las únicas variaciones existentes en el precio son generadas por cambios en el mercado.

### 2.3.2 Costo de alimentación y dieta

El suministro de un alimento balanceado constituye uno de los principales costos de los feedlots. Se puede llevar adelante el negocio cuando las relaciones de precios de los granos y de la carne son favorables. Lo más importante es determinar cuál es la unidad de energía más barata que se puede conseguir dependiendo de la concentración de energía del ingrediente relacionada con su precio. El fácil acceso al alimento y el costo de ponerlo en el feedlot son determinantes del éxito del emprendimiento. Queda claro que el costo de la alimentación quedará determinado en gran parte por la dieta que se le provea al animal.

En cuanto a la elaboración de la dieta, en la mayoría de los planteos actuales se mezcla el grano (molido, aplastado o entero) con un concentrado proteico (concentrados comerciales, o subproductos de la industria aceitera como la harina de girasol, de soja o de semilla de algodón) que a su vez aporta algo de fibra. Además se introduce un núcleo vitamínico y mineral que provee los macro y micro minerales. A esto se les suma una fuente de fibra en rollo que generalmente es heno (ofrecido entero, desmenuzado o molido). El grano es el componente mayoritario en las dietas de feedlot, comúnmente excede el 65% del total del alimento y define la oferta de energía metabolizable y las características físicas del alimento. Los granos que se emplean son principalmente el de maíz, soja y sorgo, y el de trigo y cebada en menor medida.

La eficiencia de la ración utilizada se suele medir por medio del ratio denominado de *conversión alimenticia*, que mide cuantos kilogramos de alimento (usualmente expresado en Kg de materia seca) se emplearon para obtener un kilo de aumento de carne. Entre los factores vinculados con la preparación de la dieta que afectan la conversión podemos citar los siguientes:

- *Procesamiento de los alimentos*: El tipo de grano y el procesado o la presentación definen el grado de aprovechamiento. En cuanto al maíz, el procesado de los granos

mejora la digestibilidad de la materia seca (del grano) y del almidón, y mejora el aprovechamiento, en particular de granos pequeños o duros.

- *Proporción de granos en la ración*: las dietas con alto porcentaje de granos tienen mayor cantidad de energía metabolizable y por lo tanto permiten obtener una mejor conversión. Por ejemplo con una dieta con un 80% de grano se logran conversiones de 5 – 8 Kg/ Kg de aumento de peso mientras que dietas con bajo porcentaje de granos (75 – 80 % de Forraje) se requieren 9 – 11 Kg/ Kg aumento de peso.

### 2.3.3 Nivel de actividad

Actualmente en Argentina la capacidad de los establecimientos de engorde a corral es muy variada. En general suelen ser de tamaños reducidos: el 80% de los mismos poseen cantidades inferiores a las 1000 cabezas. Solo un 6% de los establecimientos superan las 2500 cabezas de ganado y únicamente el 1% posee más de 10000 cabezas.

Los grandes establecimientos, mayores a 2500 cabezas, a pesar de necesitar mayores inversiones iniciales que otros feedlots más pequeños, logran generar economías de escala permitiéndoles obtener mayores réditos económicos en el engorde de los animales. Sin embargo hay que tener en cuenta que, a medida que los feedlots se hacen muy grandes, se torna más complicado mantener un elevado nivel de ocupación del establecimiento por lo tanto el riesgo de pérdidas es mayor. Esto conlleva a que muchas veces, cuando los feedlots superan las 4000 cabezas, también se realicen inversiones para no sólo engordar los novillos sino también introducir al sistema de engorde la cría de los terneros. Por las razones suscitadas, es de gran importancia definir adecuadamente el tamaño del feedlot que se quiere crear.

### 2.3.4 Localización del establecimiento

La ubicación de un feedlot exige un análisis de factibilidad, tanto a nivel regional como a nivel local. Es vital la determinación de la ubicación óptima del establecimiento, ya que no hacerlo puede significar un aumento considerable tanto en la inversión necesaria para la instalación del establecimiento, como en los costos operativos necesarios para llevar adelante el negocio. Además, una vez construidas las instalaciones, la relocalización del establecimiento podría significar una elevada inversión. Es por eso que se requiere un minucioso análisis antes de decidir donde se instalará el feedlot.

Los principales factores a tener en cuenta son:

- *Disponibilidad de materias primas para la alimentación:* el insumo más importante para esta actividad es la provisión continua de granos a lo largo del año, y el traslado de los mismos suele incidir mucho en su costo, determinando la viabilidad de la actividad.
- *Disponibilidad de animales para reposición:* es conveniente estar cerca de un establecimiento de cría, ya que no sólo aumenta la probabilidad de ocupación del establecimiento, sino que también se reducen los costos de transporte de los animales a engordar y, además, se evita que los mismos sufran estrés por ser transportados largas distancias.
- *Proximidad a lugar de faena y mercado consumidor:* da ventajas a la hora de transportar los animales terminados, disminuyendo el costo de traslado, riesgos y deterioro de los mismos.
- *Suelos:* debe tener buena capacidad de compactación y pendientes moderadas para evitar la formación de barro. El barro disminuye el consumo de alimento por parte de los vacunos (menor ganancia de peso diario) y su sanidad (puede provocar enfermedades respiratorias). Donde llueve frecuentemente, es acertado construir los corrales con pendientes naturales para favorecer el drenaje, reducir al mínimo el estancamiento de agua y la formación de barro, y poder construir un sistema óptimo de captación y manejo de efluentes. No obstante, las pendientes no deben superar el 5%, ya que puede que la velocidad de escurrimiento se torne erosiva. No tener el tipo de suelo más indicado no implica no poder llevar adelante el negocio, pero aumentan considerablemente los costos de limpieza y mantenimiento de los corrales.
- *Clima:* el clima ideal para llevar adelante esta actividad es uno seco, con precipitaciones bajas a moderadas, especialmente en invierno. Las bajas precipitaciones mejoran la sanidad del animal y aumentan su consumo de alimento. La temperatura es un factor importante a tener en cuenta, y no debe sobrepasar ni estar muy por debajo de los 20 °C. Se verificó que disminuye 0,07 kg/día de aumento de peso en la medida que se incrementa en 2,04 °C la temperatura por encima de los 21 °C. Por otro lado, cuando la temperatura disminuye por debajo de los 5 °C, obliga al animal a aumentar su ritmo metabólico por medio de temblores para mantener su temperatura corporal, lo que significa que parte del aporte energético que se le da al animal a través de la dieta no se utiliza para aumentar de peso.

- *Accesos y servicios:* el transporte es vital para el traslado de animales hacia y desde el feedlot, y de las materias primas que integrarán la dieta. Es por ello que se debe tener en cuenta la cercanía a rutas y buen acceso para los camiones, ya que es el medio más utilizado por la accesibilidad a la mayoría de las zonas, son flexibles en cuanto a la capacidad de carga y tienen gran disponibilidad. El transporte fluvial es otra opción para el traslado tanto de animales como de granos, principalmente en regiones cercanas a ríos. También se debe tener en cuenta la provisión de combustibles para la maquinaria, de agua potable para bebida y de energía eléctrica (para bombear agua).
- *Lejanía a puertos:* en zonas agrícolas lejanas a plantas de acopio o a puertos, donde la incidencia del flete del cereal tiene mucha importancia, la transformación del grano en carne es una forma de mejorar la rentabilidad del negocio, generando valor agregado a ambos productos. Es por eso que aumenta la disponibilidad de grano a precios más razonables en dichas regiones si no se es productor de grano.

### 2.3.5 Otros factores a tener en cuenta

Otros factores importantes son la raza que se selecciona para engordar en el establecimiento y los acuerdos con los clientes (frigoríficos).

En cuanto a la raza, la misma condiciona la madurez fisiológica del animal a un peso determinado. La misma determinará también: el ritmo de crecimiento del animal, la adaptación al lugar donde se engorda, el peso de faena, el porcentaje de rinde y la terneza de la carne, entre otras.

En la comercialización del sector ganadero participan varios agentes, desde el productor hasta el consumidor final. Cada canal tiene su respectivo costo de comercialización, que varía según los costos del transporte, de la documentación, de las comisiones, etcétera.

Dentro de la comercialización del animal en pie se distinguen 2 modalidades:

- Venta directa: la operación se realiza entre el engordador y el establecimiento de faena.
- Venta indirecta: la operación se realiza a través de mercado concentrador o un remate de feria.

*Consignatarios:* es quien realiza operaciones de compraventa de animales en forma directa o indirecta. Actúa a nombre propio y por cuenta de un tercero comitente o remitente. Su objetivo es asegurar un buen precio de venta al vendedor, y un producto de

calidad al comprador. Suele cobrar una comisión que está entre el 3% y el 4%, cobrándose a cada una de las partes.

## 2.4 Requisitos legales para la instalación de un feedlot

Los requisitos para la instalación de un feedlot se establecen según requerimientos del propio sistema (producción higiénica, segura y de calidad) y según requerimientos del entorno (evitando la degradación ambiental por contaminación de suelos, aguas y aire con agentes tóxicos y patógenos).

En cuanto a lo expuesto en la ley, la misma enuncia reglas en cuanto a la distancia del establecimiento respecto a: otros establecimientos de la misma índole, zonas urbanas y suburbanas, asentamientos rurales, institutos educacionales y de salud, zonas inundables o anegables y cuerpos de aguas superficiales. También alude a condiciones de la topografía y del suelo (que el piso asegure la no contaminación de las napas freáticas), el potencial contaminante de las deyecciones (cuidando que los efluentes generados en la actividad y el escurrimiento de origen pluvial no contaminen las napas y los cursos de agua) y la contaminación del aire producida por los olores y polvos.

La higiene en los sectores y pasos del engorde en el sistema intensivo es un punto clave para la optimización del sistema, la reducción de olores y emanaciones contaminantes al aire. Tanto los olores como las emanaciones contaminantes pueden ser producidos por una mala higiene en los sitios de acumulación de alimentos, residuos o excrementos, lagunas no planificadas y animales muertos. Es importante el drenaje de efluentes, ya que un pequeño sector mal drenado puede producir más olor que todo un feedlot bien drenado. Las precipitaciones pueden producir fermentaciones anaeróbicas con los excrementos o residuos produciendo gases de 50 a 100 veces mayores en intensidad que las emisiones diarias en suelos secos.

## 2.5 Impacto ambiental

Las instalaciones de engorde a corral, sobre todo las que poseen una densidad animal importante, tienen efectos contaminantes en el suelo, el agua y la atmósfera. A continuación se desarrollan algunos de ellos.

### 2.5.1 Efectos en la baja atmósfera (tropósfera)

Uno de ellos es el calentamiento global provocado por el “efecto invernadero” (fenómeno mediante el cual determinados gases retienen parte de la energía que la superficie planetaria emite por haber sido calentada por radiación solar), en el que participan, entre otros, 3 gases que son generados en esta actividad: dióxido de carbono ($CO_2$), metano

($CH_4$) y óxido de nitrógeno ($N_2O$). Estos gases se expresan en “millones de toneladas de carbono equivalente” ($MtCO_2$ – e) y el “potencial de calentamiento global” (PCG), donde el $CO_2$ toma el valor de 1. El $CH_4$ tiene un PCG 21 veces superior al del $CO_2$ y el $N_2O$, 310 veces superior. Las emisiones de $CH_4$ provienen de la fermentación rumial de las fracciones carbonadas, a través del eructo y de la fermentación anaeróbica del estiércol. Un bovino emite unos 60-80 $m^3$/año. Los animales son responsables del 23% aproximadamente del metano de todo el planeta. Las emisiones de $N_2O$ provienen del uso de fertilizantes químicos con nitrógeno en cultivos para forrajes y obtención de cereales para la dieta de los animales en engorde, y en cantidades mucho más pequeñas del estiércol. Las de $CO_2$ provienen de la combustión de la maquinaria utilizada en cultivos y en el sistema de engorde. Otro efecto sobre la atmósfera es la emisión de amoníaco ($NH_4$): el contenido de urea del estiércol es hidrolizado por las enzimas "ureasas" de microorganismos del suelo y del mismo estiércol, produciendo amoníaco que se volatiliza. Este gas ocasiona un olor desagradable y además puede volver a precipitar en el suelo o en la superficie de cuerpos de agua (acidificación), incrementando su contenido de nitrógeno. Finalmente, las partículas de polvo y de estiércol pueden levantarse, especialmente en zonas semiáridas o si hay un período con pocas precipitaciones.

### 2.5.2 Efectos sobre los suelos

Los cuidados, la rutina y la metodología empleada en la limpieza de los corrales adquieren real importancia para no romper la interfase endurecida de suelo. El suelo se encuentra compactado por las pisadas de los animales. Esa capa de estiércol de 2,5 a 5 cm de espesor es selladora: funciona como barrera a la infiltración y protege de la contaminación y de la erosión. Por ello es que debe ser preservada, ya que cuando no está, hay infiltración y la napa freática se contamina en el área de los corrales. Ante el riesgo de romperla es preferible realizar una compactación mecánica para homogeneizar. Si hay un alto contenido de humedad, la limpieza no resulta muy efectiva y se recurre a disminuir la carga animal de los corrales para reducir la presión sobre el suelo húmedo. Se puede pensar en tener corrales vacíos que actúen de fusibles cuando hay muchas lluvias y se encharca excesivamente. Si la pérdida de humedad no es rápida, aumentará la producción de ácidos grasos volátiles, aldehídos, alcoholes, sulfuros de hidrógeno y amonio. Se deben analizar muestras de estiércol anualmente para determinar elementos solubles o volátiles y actuar cuando exista riesgo de contaminación. Cabe aclarar que el aporte de estiércol como fertilizante cuenta con 2,5 kg de nitrógeno, 1 kg de fósforo y 0,8 kg de potasio por tonelada. Si el suelo receptor es pobre en materia orgánica, la adición resultará positiva; pero si el suelo ya cuenta con una proporción humus elevado, habrá problemas tanto de fertilidad como de contaminación.

### 2.5.3 Efecto sobre las propiedades del agua

Si el estiércol sin tratamiento previo llega a los cuerpos de agua que tienen poca renovación, se produce un fenómeno conocido como “eutrofización”. Lo que ocurre es un aumento de la disponibilidad de nutrientes, especialmente aquellos que constituyen factores limitantes para el desarrollo de organismos fotosintéticos (algas y macrófitas). Además de la eutrofización, puede darse el fenómeno de anoxia: la descomposición reduce los niveles de oxígeno y las algas por su elevada actividad metabólica lo consumen, causando la muerte de peces y otras formas de vida. En cuanto a la materia orgánica, su influencia en la alteración de las aguas subterráneas es relativamente pequeña. La población microbiológica (bacterias y virus) es retenida por el poder filtrante del suelo, recorriendo pequeñas distancias en el horizonte edáfico (relativo al suelo en relación con las plantas). En consecuencia, se puede decir con certeza que el nitrógeno es el elemento más contaminante para las aguas subterráneas. El nitrógeno está clasificado en 3 fracciones: mineralizable (Nm), orgánico (No) y residual (Nr). No todo el Nm es extraíble: tan sólo el 60% de esta fracción es extraído por cultivos, y el resto se extrae al año siguiente: se pierde por desnitrificación y lixiviación (disolvente líquido pasa por sólido pulverizado para producir la disolución de componentes solubles del sólido). Tanto en aguas superficiales como profundas, afectadas por contaminación proveniente de feedlots se ha observado una leve disminución del pH, un aumento marcado en la cantidad de sales disueltas debido al aumento de la concentración de los cationes calcio ($Ca^{+2}$) y magnesio ($Mg^{+2}$) y de los aniones cloruro ($Cl^{-}$) y nitrato ($NO_3^{-}$), y un descenso de la concentración de sodio (Na).

Es por todo esto, que es importante cumplir los requisitos que se mencionaron en la sección anterior, de manera de poder minimizar los impactos en el entorno y dentro del establecimiento.

## 2.6 Tratamiento de suelos en un feedlot

En un feedlot tradicional de piso de tierra compactada, se remueven las excretas sólidas una o dos veces al año. La retención de estiércol en corrales por varios ciclos de engorde reduce el valor fertilizante de ese material, mantiene una alta carga de excretas en los corrales, con lo que se incrementan las emisiones contaminantes al aire, agua y suelo (en especial si coincide con épocas de lluvias). La acumulación de estiércol se da por lo general cerca de los comederos, donde la generación es más rápida que el secado del mismo, por lo que la remoción periódica evita problemas de drenaje en caso de lluvia. El empleo de lomas de excremento reduce la necesidad de limpieza, haciéndose esta cada 2 o 3 años, o cuando se quiere reducir el tamaño de la loma.

En general, se apila el estiércol fuera de los corrales en forma de trincheras de 5 metros de ancho y 2 de alto aproximadamente. El lugar debe tener buena pendiente para drenaje y baja permeabilidad (para evitar filtraciones hasta las napas), logrando que las mismas escurran hacia el lugar deseado (que pueden ser lagunas de sedimentación). Se debe ir controlando el estiércol periódicamente para verificar cambios en la composición de nutrientes, minerales, humedad y materia orgánica (lo cual indica si hay filtraciones en el suelo). En estas trincheras se obtiene el llamado compost.

## 2.7 Tratamiento de efluentes en un feedlot

El manejo de efluentes líquidos y estiércol requiere un diseño de estructuras de captura y concentración, recolección, procesamiento y re-uso o dispersión de las excretas. El área de escurrimiento es la superficie del feedlot que recibe o captura líquidos. El escurrimiento queda determinado por las pendientes, longitudes y características del suelo de los corrales. Los efluentes luego pueden ser conducidos a través de canales de drenaje (que pueden ser de tierra compactada o de cemento) y tratados para evitar su infiltración o movimiento descontrolado. Por lo general son conducidos hacia lagunas de sedimentación y almacenamiento.

Las lagunas pueden ser de retención (aeróbicas) o facultativas (anaeróbicas). Las primeras retienen los efluentes temporariamente, hasta que estos luego se aplican a la tierra mediante riego. Son poco profundas y de gran capacidad para la degradación de la materia orgánica. Las segundas se utilizan para conservar los efluentes por tiempos prolongados y permitir el tratamiento parcial del agua antes de su uso. Son más profundas (para que ocurra la fermentación) y con una menor superficie expuesta para la evaporación.

Las lagunas de sedimentación se utilizan para detener el escurrimiento y permitir la decantación de sólidos. El fondo de las mismas debe ser tratado con frecuencia e impermeabilizado para impedir infiltraciones. Además deben estar preparadas para desbordes (vertederos donde puedan descargar). Luego de las de sedimentación puede haber lagunas de evaporación para eliminar el agua de los efluentes. Las lagunas de almacenamiento se utilizan para almacenar efluentes líquidos por períodos largos de tiempo. Su tamaño es de hasta 20 veces el de la laguna de sedimentación, dependiendo de las precipitaciones de la zona. Sus superficies deben estar impermeabilizadas con arcillas, plásticos o cementos para evitar infiltraciones. Se deben remover sedimentos acumulados cada 3 años aproximadamente.

## 2.8 Subproductos del feedlot:

Es importante aclarar que el abono o compost que se obtiene a partir del estiércol y cuya humedad se disminuyó o eliminó por completo en las trincheras no aportarán nutrientes al suelo inmediatamente una vez aplicados. Antes se debe degradar la materia orgánica para que se liberen los nutrientes en forma de solubles. Este proceso no es instantáneo, con lo cual sólo la mitad de los nutrientes aportados estarán disponibles para el cultivo en el primer año.

El efluente líquido que se recolecta en las lagunas de almacenamiento puede utilizarse como compostaje líquido para regar y así fertilizar los suelos. Si se utiliza el riego en área de cultivos, previamente se debe analizar la capacidad del suelo para asimilar y retener nutrientes, para ver si no se debe diluir en agua el efluente. Es importante aclarar que no se pueden utilizar los efluentes de un feedlot como riego directo a largo plazo, ya que los mismos tienen un alto grado de salinidad, lo que lleva a disminuir la eficiencia de captura de nutrientes y la calidad del suelo.

## 2.9 Anatomía del bovino:

### 2.9.1 Sistema digestivo:

Los bovinos o rumiantes se caracterizan por su capacidad para alimentarse de pasto, forraje o granos. Esta característica se basa en la posibilidad de poder degradar los hidratos de carbono estructurales del carbono, como celulosa, hemicelulosa y pectina, muy poco digestibles para las especies de estómago simple. Basada en esta diferencia fundamental, la fisiología digestiva del rumiante adquiere características particulares. La degradación del alimento se realiza mayoritariamente por digestión fermentativa (muy similar al proceso de digestión anaeróbica que se lleva adelante en un biodigestor) y no por acción de enzimas digestivas. Los procesos fermentativos los realizan diferentes tipos de microorganismos a los que el rumiante aloja en sus divertículos estomacales. Esta digestión fermentativa, si bien favorece al rumiante al permitirle degradar hidratos de carbono, también afecta la digestión de todos los demás componentes de la dieta, expuestos a los mismos procesos fermentativos sin que esto represente siempre una ventaja desde el punto de vista del mejor aprovechamiento del alimento (efecto de llenado rápido). Es por eso que para que el animal obtenga altas ganancias de peso, se debe lograr que consuman raciones con alto contenido energético y bajas en fibra.

El sistema digestivo de los rumiantes se divide en cuatro cavidades: retículo, rumen, omaso y abomaso. Sólo este último es glandular y funcionalmente análogamente al estómago del no rumiante, mientras que los anteriores están cubiertos por un epitelio queratinizado y carecen de glándulas. La mayor parte de la digestión se realiza en el

rumen (60 – 70%), que representa en animales adultos un 75% de la cavidad abdominal, y este junto con su contenido representan hasta un 30% del peso vivo del rumiante. El rumen posee en su interior papilas que aumentan la superficie de absorción de los productos de la fermentación microbiana, y cuyo tamaño y grado de queratinización dependen del estímulo provocado por la dieta que esté consumiendo el animal. Durante la fermentación ruminal, la población de microorganismos (principalmente bacterias) fermenta los carbohidratos para producir sustancias absorbibles por la membrana del rumen (proteínas), gases metano, dióxido de carbono y aminoácidos.

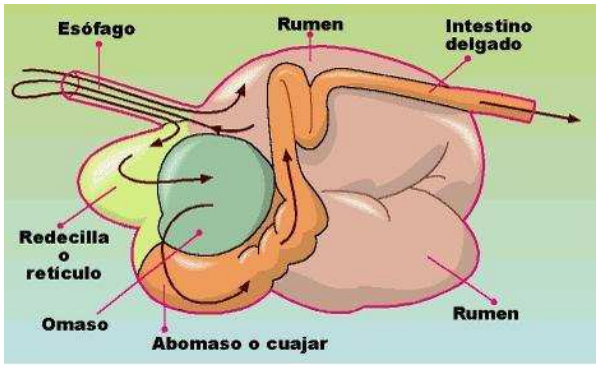


*Figura 2.9.1-1. Sistema digestivo de los bovinos*

## 2.9.2 Dieta:

En cuanto a la dieta, el porcentaje de fibra debe ser mínimo para mantener el rumen funcional, ya que un alto contenido disminuye la digestibilidad del grano y con ella la ganancia diaria de peso (menor eficiencia de conversión). Además, debe contener minerales, ya que los mismos no pueden ser sintetizados por el organismo del rumiante (en porcentajes bajos, dado que de lo contrario puede resultar tóxico para el animal). También se debe controlar el tipo y la cantidad de almidón que contiene el grano (determina digestibilidad y absorción de nutrientes). Finalmente, los granos molidos aumentan la digestión total en el rumen (mejora el ataque de las enzimas bacterianas), mientras que el grano entero aumenta la digestión en el intestino, lo que disminuye la digestión del almidón.

## 2.9.3 Desechos del bovino:

### *2.9.3.1 Gases:*

El principal gas es el metano. Depende del volumen de alimento consumido y de la composición de la ración. El volumen que puede producir un bovino varía entre 120 $m^3$ por año en una vaca productora de carne y 60 a 80 m3 por año en un novillo en engorde.

A mayor proporción de alimento de alta energía en la dieta (almidón), menor volumen consumido con menor cantidad de materia seca. Cambia el tipo de fermentación con la consiguiente menor producción de metano, diaria y total, ya que disminuye el tiempo que está el animal en período de engorde.

#### *2.9.3.2 Excreta:*

En el feedlot la materia fecal y la orina forman un solo tipo de residuo, que se denomina estiércol, ya que no se pueden separar. Un vacuno excreta por día alrededor del 5 al 6% de su peso vivo (0,05 a 0,06 kg de excreta húmeda por kilogramo de peso vivo). Para los cálculos se tomará el valor de 6% del peso vivo del animal, ya que se supondrá que se lo alimenta con una dieta baja en fibras, de alta digestibilidad, como se recomienda. En un novillo de 400 kg sería alrededor de 24 kg diarios de estiércol (excreta húmeda). Dado su porcentaje de humedad del 85%, finalmente serían unos 3,6 kg diarios de residuo sólido por animal, en promedio, que se eliminarían en el corral. La composición en nutrientes, como porcentaje de sólidos totales secos, es aproximadamente en el estiércol recién excretado de: nitrógeno 3 - 4%; fósforo 1 - 2%; potasio 1,5 - 3%; calcio 0,6%. Las deyecciones contienen nutrientes, ya que el bovino absorbe en proporción muy poco de lo que ingiere. El 70 a 80% del nitrógeno consumido se elimina con las excretas: en la materia fecal, como nitrógeno de proteína bacteriana y proteína directa del alimento. En orina, proviene de la urea. Más del 90% del fósforo que ingresa con la dieta se elimina con la materia fecal en forma de fosfatos. Cualquier otro exceso de minerales en el alimento aparecerá en las excretas, dada la fisiología digestiva.

# 3 EL PROCESO DE BIODIGESTIÓN

Este proceso consiste en el tratamiento de residuos orgánicos para transformarlos en productos con valor agregado. Estos tratamientos se pueden llevar a cabo en presencia o en ausencia de oxígeno, diferenciándose así dos tipos de procesos de biodigestión:

## 3.1 Digestión aeróbica

Consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular. Es un proceso mediante el cual los lodos de residuos orgánicos son sometidos a una aireación prolongada (por ejemplo en un tanque separado y descubierto). El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la auto-oxidación de la materia celular. Los productos finales del mismo son dióxido de carbono y agua. Este tratamiento tiene la desventaja de requerir un alto consumo de energía para el suministro de aire al proceso. La principal ventaja es la simplificación en las operaciones de disposición de los lodos comparada con la relativa complejidad operativa del proceso de digestión anaeróbica.

### 3.1.1 Compostaje:

El llamado compostaje o “composting” es un proceso de digestión aeróbica, mediante el cual los microorganismos (micro-fauna y flora del suelo) actúan sobre la materia orgánica rápidamente biodegradable (desechos orgánicos vegetales y animales), permitiendo obtener una sustancia fertilizante denominada abono, el cual también mejora la estructura y estabilidad de la tierra. Un ejemplo de producción de compostaje se da en las trincheras de estiércol que se forman alrededor de los corrales en un feedlot. Allí, el estiércol se va apilando en capas para permitir una mayor evaporación y acción microbiana aeróbica. En el caso del compostaje a partir del estiércol, es importante controlar la relación Carbono/Nitrógeno. El estiércol recién salido del animal ofrece una relación 15 a 1, mientras que lo ideal para el compostaje es de 30 a 1, por lo que se debe mejorar agregando carbono mediante rastrojos de cosecha u otros residuos fibrosos.

## 3.2 Digestión anaeróbica

Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás por un consorcio de bacterias (que son sensible o completamente inhibidas por el oxígeno),

dejando como residuo un biofertilizante. Este mismo proceso es el que ocurre en algunos organismos animales, como por ejemplo el rumen de una vaca. El mismo es muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.

### 3.2.1 Etapas

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso en 4 etapas:

1) Hidrólisis:

   La materia orgánica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular. En esta etapa se rompen las moléculas complejas orgánicas (proteínas, lípidos y carbohidratos) por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos, transformándose en compuestos solubles (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga y azúcares). Puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso, sobre todo cuando los residuos tienen alto contenido de sólidos. Las variables que afectan el proceso son: la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato, el tamaño de partículas, el nivel de pH, la concentración de $NH_4$ y la concentración de los productos de la hidrólisis.

2) Etapa fermentativa o acidogénica:

   En esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles, transformándose en compuestos orgánicos más reducidos (ácido acético, fórmico, propiónico, butírico, valérico, láctico, etanol, hidrógeno y dióxido de carbono) que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas o previamente en la acetogénesis. La importancia de esta etapa no sólo radica en el hecho de que se produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Las bacterias actuantes en esta etapa son facultativas y denominadas “formadoras de ácidos”. Estas tienen una reproducción muy rápida y son poco sensibles a cambios en la temperatura y en la acidez del sistema.

3) Etapa acetogénica:

   Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ($H_2$ y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados

en productos más sencillos (como acetato ($CH_3COO$-) e hidrógeno ($H_2$)) a través de las bacterias acetogénicas, para poder ser utilizados como sustrato por las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

4) Etapa metanogénica:

En esta etapa actúan bacterias anaeróbicas estrictas sobre los productos de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos (de lenta reproducción y muy sensibles a cambios de temperatura y acidez) pueden ser considerados los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los encargados de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente (acetato, $H_2$, $CO_2$, formato, metanol y algunas metilaminas), produciendo además dióxido de carbono y agua. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, según la siguiente fórmula:

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

*Fórmula 3.2.1-1*

Mientras que el metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico (reducido por el $H_2$), ácido fórmico y metanol o del proceso conocido como metanogénesis hidrogenofílica, cuya

$$4\,H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2\,H_20$$

*Fórmula 3.2.1-2*

A continuación se presenta un esquema que contiene las etapas del proceso de digestión anaeróbica, que es el que se produce dentro de los biodigestores:

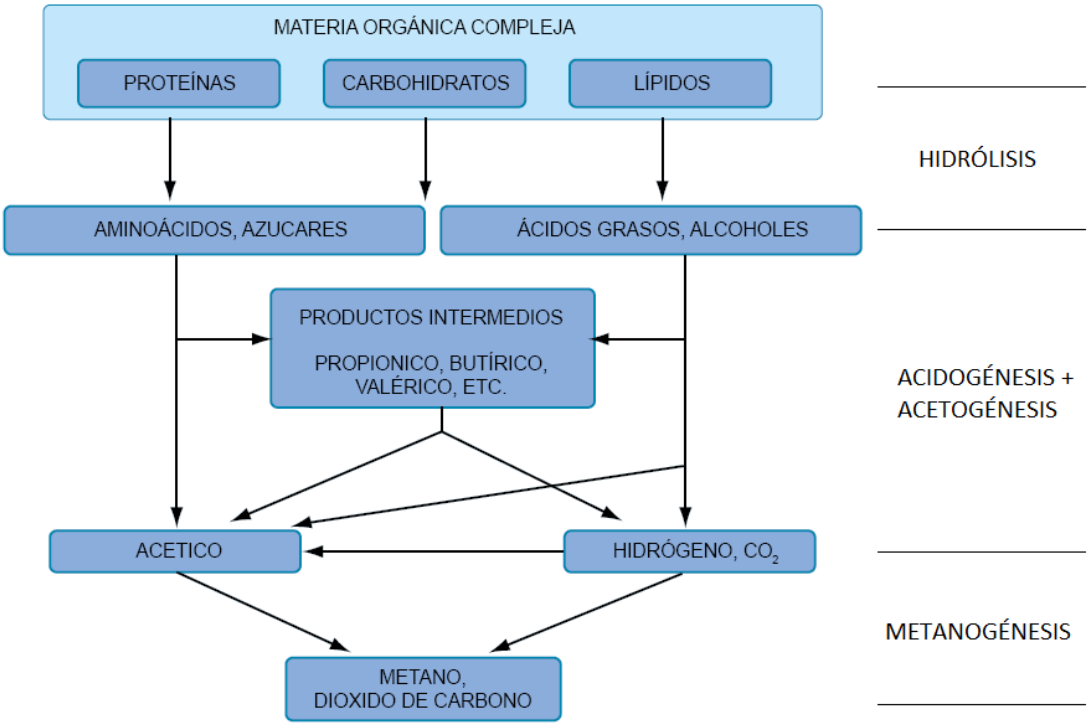


*Figura 3.2.1-1. Etapas de la digestión anaeróbica*

## 3.2.2 Parámetros básicos de control del proceso

Es fundamental analizar los parámetros que gobiernan el proceso metanogénico, mediante el cual se produce el biogás, ya que los microorganismos que lo llevan a cabo son altamente susceptibles a cambios en las condiciones ambientales. Algunos de estos parámetros son: tipo de sustrato, temperatura, tiempo de retención hidráulico, rangos de pH, condiciones redox, carga orgánica y tratamientos para promover el proceso. A continuación se analizan los parámetros enunciados.

### *3.2.2.1 Tipo de sustrato*

Las diversas materias primas (residuos orgánicos) que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, incluyen: excrementos animales (estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos, residuos de pescados), aguas residuales y sub-productos de algunas industrias (salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas), restos de cosechas (malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado), aguas grises domiciliarias (cloacas), fracción orgánica de la basura y biomasa (cultivos energéticos).

A su vez, dentro de este parámetro hay que tener en cuenta otras características de los sustratos a utilizar. Los mismos incluyen:

- Disponibilidad de nutrientes:

  Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico. La disponibilidad de nutrientes del sustrato determinará la producción de biogás, y al mismo tiempo el porcentaje de metano. Esto se puede ver para los principales sustratos a analizar en la siguiente tabla:

| SUSTRATO | $M^3$ BIOGÁS/Tn SV | % $CH_4$ |
|---|---|---|
| -Cama de Pollo | 350 | 60 |
| -Estiércol de Vaca líquido | 350 | 60 |
| -Estiércol de Porcino (carne) líquido | 500 | 65 |
| -Estiércol liquido de chanchas madres | 400 | 65 |
| -Ensilado remolacha azucarera | 716 | 51 |
| -Maíz ensilado (lechoso) alta calidad | 590 | 52 |
| -RSU (fracción orgánica) | 370 | 61 |

*Tabla 3.2.2-1. Producción de biogás y porcentaje de metano por sustrato*

- Porcentaje de sustancias sólidas:

  La materia orgánica está compuesta por agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). A su vez, los ST se componen de materia seca (% de residuos que quedan cuando la materia orgánica se seca a 105,5 $^{o}$C en estufa durante 24 horas) y sólidos volátiles (residuos que quedan cuando se quema la materia seca del sustrato a 550 $^{o}$C durante 6 horas, o sea la

diferencia entre la materia seca y las cenizas). Estos últimos contienen componentes orgánicos que serán convertidos a metano. El porcentaje de ST contenidos en la mezcla con que se carga el biodigestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de biogás. Además, con la presencia de las sustancias sólidas, se facilita la formación de costras en la superficie de la mezcla, lo cual lleva a que las sustancias gaseosas no puedan separarse para ser extraídas, o lodos en el fondo, que no permite que actúen correctamente las bacterias sobre la materia orgánica. Se formarán lodos o una costra según la densidad de las sustancias sólidas. Esto trae consigo la necesidad de implementar mecanismos de mezclado al aumentar el porcentaje de sólidos totales, que también traen como ventaja regular el pH y evitar que se formen microambientes dentro del ambiente del biodigestor. A continuación se presenta una tabla con los principales sustratos a analizar y sus porcentajes de materia seca/sólidos totales y de sólidos volátiles/materia seca:

| SUSTRATO | Masa Seca / sólidos totales (%) | Sólidos volátiles (%) |
|---|---|---|
| -Cama de Pollo | 55 | 71,5 |
| -Estiércol de Vaca líquido | 7,5 | 78,5 |
| -Estiércol de Porcino (carne) líquido | 1 | 80,5 |
| -Estiércol liquido de chanchas madres | 3 | 77,5 |
| -Ensilado remolacha azucarera | 16 | 75 |
| -Maíz ensilado (lechoso) alta calidad | 23 | 94,5 |
| -RSU (fracción orgánica) | 50 | 60 |

*Tabla 3.2.2-2. Porcentaje de masa seca sobre sólidos totales y de sólidos volátiles por sustrato*

- Relación Carbono/Nitrógeno:

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1. Si hay demasiado nitrógeno, las bacterias no

podrán utilizar todo el carbono disponible y la producción de metano disminuirá.

- Sustancias tóxicas e inhibidores:

  Son las sustancias que no dejan que ocurra el proceso de digestión anaeróbica. Las mismas pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado. A continuación se presentan los principales inhibidores, con su respectiva concentración inhibidora:

| INHIBIDORES | CONCENTRACION INHIBIDORA |
|---|---|
| -SO4 | 5.000 ppm |
| -NaCl | 40.000 ppm |
| Nitrato | 0,05 mg/ml |
| -Cu | 100 mg/l |
| -Cr | 200 mg/l |
| -Ni | 200-500 mg/l |
| -CN | 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 3.2.2-3. Inhibidores y su concentración inhibidora*

- Contenido de lignina:

  Este es el principal compuesto de la madera y pajas, y para ambientes anaeróbicos es un compuesto casi inerte. No sólo es muy difícil de descomponer, sino que protege a las estructuras vegetales del ataque de bacterias. Esta función de protección es tan importante que hoy en día se calcula el grado de descomposición de los materiales respecto de su contenido de lignina. Sustancias con alto grado de lignina deberán pasar

por un tratamiento previo (cortado, macerado, compostaje) a fin de liberar las sustancias factibles.

#### *3.2.2.2 Temperatura*

La velocidad de reacción de los procesos biológicos (y entre ellos los procesos anaeróbicos) está atada a la velocidad de crecimiento y reproducción de los microorganismos involucrados, la cual a su vez depende fuertemente de la temperatura. Al aumentar la temperatura se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás y biofertilizante. La temperatura de operación es considerada como uno de los parámetros de diseño a la hora de la construcción de un biodigestor, ya que puede desestabilizar el proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura. Aunque el biogás se puede producir a temperaturas menores a 10 $^{o}$C (criofílica), existen 3 rangos de temperaturas óptimos en los cuales pueden vivir y desarrollarse mejor los microorganismos que se encargan de la biodigestión: psicrofílica (10-25 $^{o}$C), mesofílica (25-45 $^{o}$C) y termofílica (45-65 $^{o}$C). En cada rango posible de operación existe una temperatura de trabajo óptima, donde la tasa de crecimiento de los microorganismos (y por lo tanto la producción de gas) son máximas. A continuación se presentan dos gráficos que representan la tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos (en %) y la producción de biogás (en litros/kg de solvente) en función de la temperatura (en $^{o}$C):

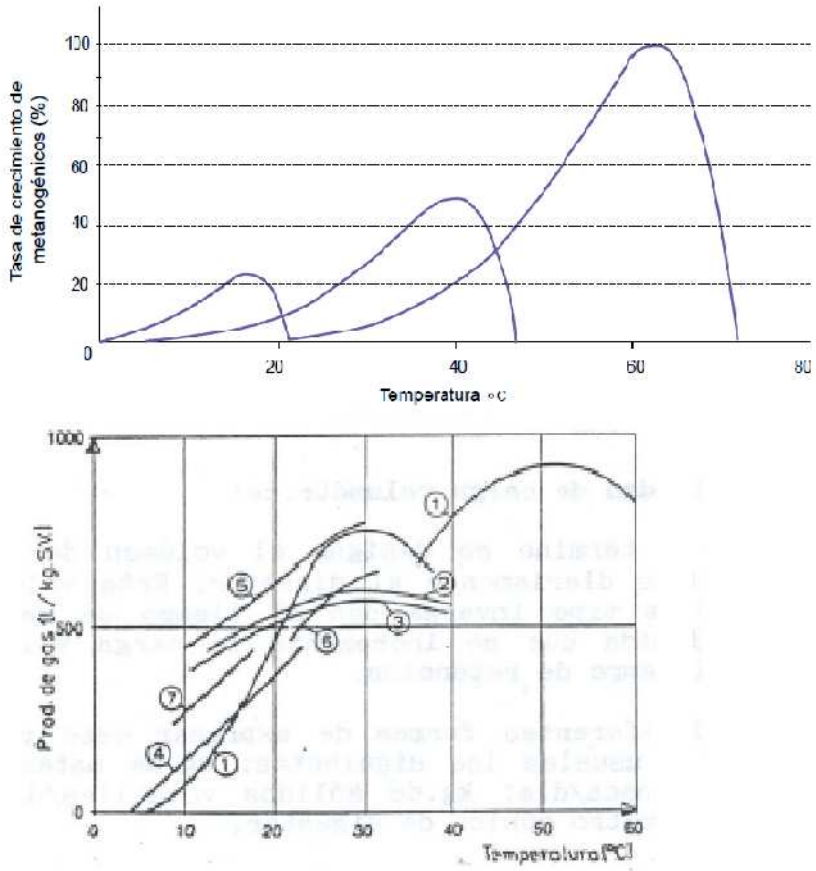


*Figura 3.2.2-1. Crecimiento de Microorganismos Metanogénicos y Producción de Gas vs. Temperatura*

Se puede observar que los picos en el primer gráfico coinciden con los del segundo, ya que el crecimiento de los microorganismos está directamente relacionado con la producción de biogás. A temperaturas mayores a 65 $^{o}$C, se puede deteriorar el proceso de biodigestión, lo cual hace imprescindible un control constante de la temperatura operativa.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndosela transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para gases tales como $NH_3$, $H_2$ y$H_2S$, dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del $CO_2$ provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en lodos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por $NH_3$.

### *3.2.2.3 Tiempo de retención hidráulico (T.R.H.)*

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo que el sustrato permanece dentro del biodigestor. El T.R.H. junto con la velocidad de carga orgánica (volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al biodigestor) son, junto con la temperatura operativa, los principales parámetros de diseño, definiendo al volumen del biodigestor. 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 del biodigestor. Existe una "zona optimista" de producción de biogás, definida por el T.R.H. y la temperatura de trabajo. En el siguiente gráfico se puede visualizar la misma:

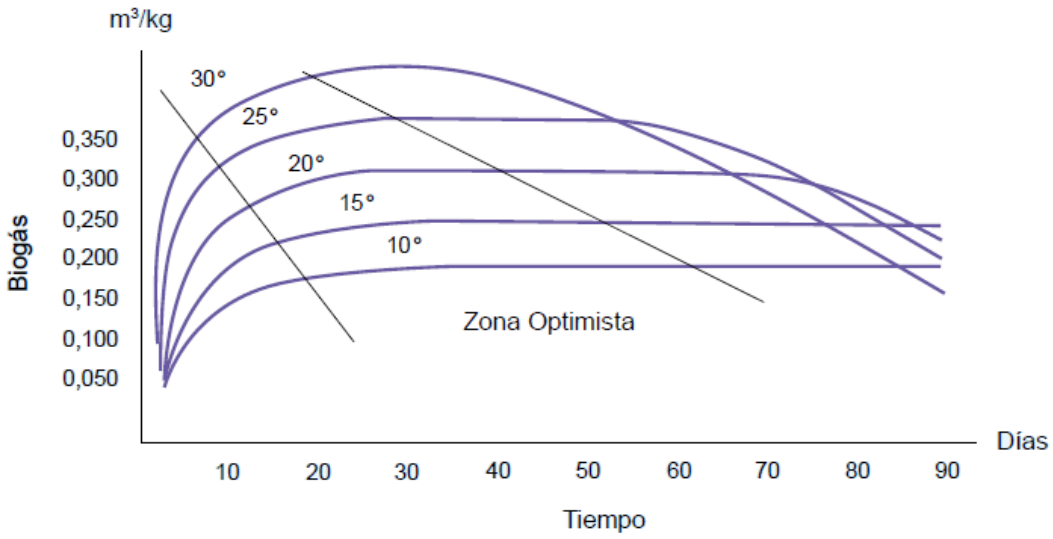


*Figura 3.2.2-2. Producción de biogás vs. Tiempo de Retención Hidráulico*

### *3.2.2.4 Carga orgánica*

La velocidad de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor. La carga orgánica está directamente relacionada con el tiempo de retención hidráulico. En un biodigestor que opera a régimen estacionario o "discontinuo", el tiempo de retención hidráulico es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. En un sistema de carga diaria (régimen "semicontinuo"), el T.R.H. va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al biodigestor, según la siguiente relación:

$$Volumen\ de\ carga\ diaria\ \left(\frac{m^3}{día}\right) = \frac{Volumen\ del\ biodigestor\ (m^3)}{Tiempo\ de\ retención\ hidráulico\ (días)}$$

#### *3.2.2.5 Rangos de pH*

Los microorganismos metanogénicos son sensibles a variaciones en los niveles de pH que se encuentran fuera del rango óptimo (entre 6.8 y 7.5 es el rango ideal). El valor del pH no sólo determina la producción de biogás, sino que también determina su composición y el grado de acidez que tendrá el biofertilizante. Los valores bajos de pH reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos provocando la acumulación de ácido acético, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno (H2S). Este último dificulta el trasporte del biogás, ya que erosiona las tuberías metálicas. Los valores altos de pH favorecen la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano. Muchas veces se utilizan sustancias reguladoras ("buffers") para mitigar dichas variaciones y para que el sistema anaeróbico funcione correctamente.

#### *3.2.2.6 Potencial redox*

Este potencial es una medida que indica la tendencia de los elementos químicos a captar o ceder electrones. Para un adecuado crecimiento de los anaerobios obligados, el valor del potencial redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. El oxígeno tiene un potencial redox de +810 mV, con lo cual se ve la importancia de las bacterias facultativas que participan en la etapa acidogénica, que se encargan de eliminar las partículas disueltas del mismo para permitir un ambiente con un potencial óptimo para que se pueda llevar adelante el proceso.

#### *3.2.2.7 Tratamientos para la mejora del proceso*

Consiste en realizar tratamientos (o pre-tratamientos) físicos y químicos para promover la metanogénesis, y consigo la producción de biogás y biofertilizante. A continuación se explican algunos de ellos:

- <u>Pre-tratamientos de la materia orgánica:</u>

  Para una correcta digestión de la materia orgánica, es necesario que la acción de las bacterias se produzca en la mayor superficie posible. Para favorecer este efecto, se emplean tratamientos preliminares en la materia antes del ingreso de la misma al biodigestor. Manteniendo la sustancia orgánica con un porcentaje elevado de humedad, se consigue una dilatación de los poros y una mayor posibilidad de que las enzimas

penetren en el interior de la misma, mientras que con una trituración de la materia se aumenta la superficie de ataque de las bacterias, y por consiguiente una mayor eficiencia. Por otro lado, para evitar retrasos antes de que las bacterias presentes en las excretas animales comiencen a producir biogás, se agrega al biodigestor parte de la materia restante de la producción anterior. Finalmente, un pre-tratamiento aeróbico favorece la distribución de hidratos de carbono poco polimerizados que podrían bloquear la fermentación a causa de una fase ácida.

- Co-Digestión:

  Consiste en mezclar diferentes sustratos para incrementar el rendimiento de la biodigestión, incrementando la producción de biogás y mejorando al mismo tiempo la aptitud del biofertilizante. Es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro. Los Co-digestores por excelencia son el maíz, el trébol, el sorgo y la remolacha azucarera, y las alternativas son la glicerina (sub-producto de la industria del biodiesel), sub-productos de plantas de alimentos y restos de cosechas (semilleros), entre otros.

- Agitación / Mezclado:

  Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de una costra que se forma en la superficie de la mezcla dentro del biodigestor, uniformar la densidad bacteriana, evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor, prevenir la formación de espumas y prevenir la sedimentación en el reactor (que lleva a que se produzcan lodos en el fondo del mismo). En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cual el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás.
  La agitación aumenta la producción de biogás y disminuye el T.R.H., esto es básicamente por cuatro razones:
  - Distribución uniforme de la temperatura y substrato en el interior del biodigestor.
  - Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
  - Mayor contacto entre el substrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.

- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata”, “espuma” o “costra” que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

- Mecánica: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- Hidráulica: a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de biogás: se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa.

- Sistemas de calentamiento:

Como se dijo previamente, el aumento en la temperatura lleva a que aumente la producción de biogás y biofertilizante y a que se disminuya el tiempo de retención hidráulico. Para garantizar una temperatura óptima constante dentro del biodigestor, se pueden utilizar fuentes externas de calor. Las mismas pueden ser internas o externas.

- Los sistemas de calentamiento externo se basan en el calentamiento del biodigestor utilizando la radiación solar. Generalmente los biodigestores tienen la mayor parte de su volumen bajo tierra, para evitar su enfriamiento por la acción del viento, y la parte superior expuesta al aire para captar los rayos solares.
- A su vez, los sistemas de calentamiento internos se obtienen con serpentinas en el interior del biodigestor donde circula un fluido con una temperatura prefijada. Estos fluidos pueden ser calentados con el biogás de la misma producción (utilizando una caldera) o también con paneles solares.

# 4 PRODUCTOS DEL PROCESO DE BIODIGESTIÓN

Como se dijo previamente, los productos del proceso de digestión anaeróbica son el biogás y biofertilizante. A continuación se explicarán las características de cada producto y su posible utilización y aprovechamiento.

## 4.1 Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada por: metano ($CH_4$), dióxido de carbono ($CO_2$), nitrógeno gaseoso ($N_2$), hidrógeno ($H_2$), ácido sulfhídrico ($H_2S$), oxígeno ($O_2$) y trazas de otros gases (vapor de agua, siloxanos e hidrocarburos halogenados). La composición del biogás depende del sustrato utilizado en el proceso de biodigestión y del funcionamiento (rendimiento) del mismo. El dióxido de carbono, el hidrógeno, el ácido sulfhídrico y el vapor de agua pueden considerarse como impurezas del biogás, y atentan contra su combustión.

### 4.1.1 Componentes

A continuación se desarrollan cada uno de sus componentes a grandes rasgos:

- *Metano ($CH_4$):* es el principal compuesto del biogás (40 – 60 % aproximadamente, dependiendo del tipo de nutrientes que posee el sustrato), y es el principal elemento que contribuye a la combustión del biogás. Es un gas liviano, de densidad de 0,55 respecto de la del aire, y puede ser licuado por congelamiento (a -165 $^oC$) o por compresión (400 atm.). Posee un poder calorífico de 8843 kcal/$m^3$, siendo la temperatura de combustión de 1500 – 2000 $^oC$. La combustión del metano responde a la siguiente reacción química:

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 212\ kcal$$

*Fórmula 4.1.1-1*

- *Dióxido de carbono ($CO_2$):* es un gas incoloro e inodoro presente en la atmósfera. Es un gas más pesado que el aire, y solidifica a unos -80 $^oC$, mientras que a los 2500 $^oC$ se transforma en monóxido de carbono y oxígeno. Este gas es perjudicial para la combustión.

- *Nitrógeno gaseoso ($N_2$):* es un gas incoloro e inodoro, presente en la atmósfera en un 78%. Su excesiva presencia en el biogás es evidencia de que el proceso de fermentación del sustrato fue aeróbico (en presencia de oxígeno), y puede haber sido por una pérdida en el biodigestor. A elevadas temperaturas reacciona en

presencia del oxígeno para formar óxido de nitrógeno, uno de los responsables de la contaminación atmosférica.

- *Hidrógeno ($H_2$):* gas incoloro e inodoro, y el más liviano presente en la naturaleza. Es fácilmente inflamable y la presencia del mismo en el biogás representa una fermentación no estabilizada.

- *Oxígeno ($O_2$):* es un gas inodoro, incoloro e insípido que está presente en la atmósfera en un 21%. Participa en la combustión del metano y del biogás.

- *Ácido sulfhídrico ($H_2S$):* es un gas incoloro con olor nauseabundo. Se puede encontrar en la naturaleza en el gas natural. Es un gas combustible, pero su combustión genera dióxido de azufre, que a su vez da origen al ácido sulfúrico (muy corrosivo para tuberías, como también para motores y sus componentes).

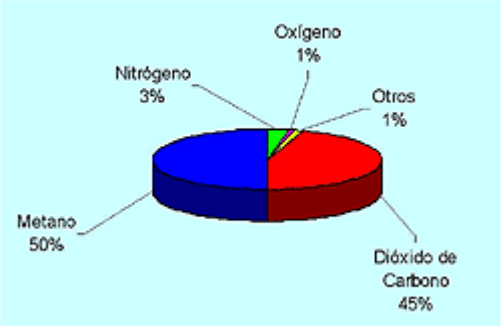


*Figura 4.1.1-1. Composición del biogás*

Para que el biogás combustione, se requiere un mínimo de 21% de aire, aunque para lograr que la combustión sea de mayor rendimiento se debe proporcionar mayor cantidad de aire. La relación aire – gas puede ser optimizada aumentando la presión del aire. La presión adecuada para un óptimo uso del biogás oscila entre los 7 y los 20 milibares. Se debe tener especial precaución en este aspecto, para lo cual se debe calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes).

### 4.1.2 Aplicaciones

Entre las diversas aplicaciones del biogás se pueden mencionar: producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible para vehículos.

#### *4.1.2.1 Producción de calor o vapor:*

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua, reemplazando a la leña o el carbón. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de $H_2S$ inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C.

#### *4.1.2.2* Cogeneración eléctrica - térmica*:*

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. De esta manera se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor por separado. Una planta de cogeneración está compuesta por un motor de combustión interna, una turbina de gas o una de vapor que acciona un alternador (generador eléctrico). A este conjunto generador se le puede aprovechar la energía térmica liberada en la combustión de gases mediante intercambiadores de calor instalados en los circuitos de refrigeración de camisas, de aceite lubricante, más un aprovechamiento extra en la caldera de recuperación de los gases de escape. Las turbinas de gas se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de $H_2S$ (bajo las 100 ppm) y vapor de agua. Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones.

A continuación se muestra una imagen de un cogenerador que funciona con un motor de combustión interna alternativo. El mismo tiene una potencia de 370 kW eléctricos, generando también 433 kW térmicos. Su eficiencia total es de 84,9% (39,1% de eficiencia eléctrica y 45,8% de eficiencia térmica).

*Figura 4.1.2-1. Cogenerador eléctrico térmico de motor alternativo*

### *4.1.2.3 Combustible para vehículos:*

El uso del biogás en vehículos es posible, y se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural (biometano), para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a nafta como a diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido. El uso del biogás en vehículos no es muy frecuente por las siguientes razones: se requiere almacenarlo a una presión muy elevada (200 – 300 bares), requiere purificación (extracción de $H_2S$), de lo contrario se incurre en altos gastos de reparación, la conversión del motor para que pueda ser utilizado con biogás es costosa, los cilindros son muy pesados y falta una red de abastecimiento y energía para la compresión necesaria. No obstante, algunos fabricantes dotan de fábrica a los motores con la capacidad de usar biogás, como el Fiat Siena Tetrafuel en Brasil: funciona con gasolina, bioetanol E85 y E100, GNC y biogás.

*Figura 4.1.2-2. Vehículo con motor adaptado para funcionar con biogás*

A continuación se muestra una tabla en la cual se compara al biogás con otros gases que pueden utilizarse como combustible, a modo de comparación:

| Gas | Composición | Poder calorífico (kcal/$m^3$) | Densidad al aire ($r_o$ = 1,2) | Velocidad de la llama (cm/seg) | Necesidad de aire ($m^3/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Metano | 100 % $CH_4$ | 8843 | 0,554 | 43 | 9,5 |
| Butano | 100 % $C_4H_{10}$ | 28300 | 1,566 | 57 | 233,8 |
| Propano | 100 % $C_3H_8$ | 22000 | 2,01 | 45 | 30,9 |
| Gas natural | 85 % $CH_4$ ; 15 % otros | 9000 | 0,384 | 60 | 7 |
| Gas carbón | 50 % $H_2$ ; 26 %$CH_4$ ; 24% $N_2$ | 3500 | 0,411 | 82 | 3,7 |
| Biogás | 50% $CH_4$ ; 45 % $CO_2$ | 5200 | 0,94 | 40 | 5,7 |

*Tabla 4.1.2-1. Comparación de gases combustibles*

Es muy común que el biogás pase por una serie de tratamientos previos a su utilización, según para qué se quiera utilizar. Las dos razones más importantes por las cuales se realizan estos tratamientos de purificación son: aumentar el poder calorífico del gas y cumplir con los requerimientos de algunas aplicaciones del biogás (en motores, turbinas, etc.). Algunos de estos tratamientos son los siguientes: filtro de ácido sulfhídrico, filtro de condensados, eliminación de $CO_2$, remoción de agua, desulfuración.

## 4.2 Biofertilizante

Es de gran importancia el papel que desempeña la materia orgánica en la génesis y evolución de los suelos, sobre todo cuando los mismos son de formación reciente, constituyendo en este caso la única fuente de reserva de nitrógeno. La cantidad y calidad

de la materia orgánica influye sobre diversos procesos físicos, químicos y biológicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos. Muchas veces se implementa la práctica de incorporar directamente al suelo la misma, lo cual constituye un manejo poco recomendable por el tiempo que esta requiere para transformarse en compuestos asimilables por las plantas, a través de los procesos de mineralización y de humificación. La estabilización de residuos orgánicos previo a su incorporación al suelo, tiene como finalidad acelerar la descomposición o mineralización primaria de subproductos y residuos orgánicos, para obtener un producto orgánico más estable biológicamente y más fácilmente asimilable por las plantas. Los bioprocesos utilizados para estabilizar los residuos orgánicos, se basan en una digestión de tipo aeróbica (compostaje, lombricultura) para obtener compost o de tipo anaeróbico (digestión anaeróbica) para obtener biofertilizante.

Así, además del biogás, el otro de los productos obtenidos en el proceso de biodigestión anaeróbica es el biofertilizante. El mismo es un lodo o fango líquido residual orgánico de excelentes propiedades fertilizantes. Los principales nutrientes que aporta el mismo son el nitrógeno, el fósforo y el potasio. A continuación se presentan algunas de las ventajas que trae aparejadas:

- Es fijador del nitrógeno del medio ambiente para la alimentación de la planta.
- Protege la planta ante microorganismos patógenos del suelo.
- Estimula el crecimiento del sistema radicular de la planta.
- Mejoradora las propiedades del suelo y lo regenera.
- Incrementa la solubilización y la absorción de nutrientes como el fósforo, que de otra forma no son de fácil asimilación natural por la planta.
- Incrementa la tolerancia de la planta a la sequía y a la salinidad.
- El mercado paga un sobreprecio por el producto orgánico en muchos casos.
- Su uso reduce el impacto negativo en el suelo.

El fango producto de la biodigestión posee dos componentes: una fase líquida, que denominaremos “biol”, y una fase sólida, que denominaremos “biosol”. La proporción aproximada de cada uno en el efluente originado a partir de estiércol de bovinos es 97% de biol contra sólo un 3% de biosol. Se pueden separar mediante piletas de sedimentación.

### 4.2.1 Biol

Es la fase líquida del fango. Su composición depende mucho del sustrato utilizado en la biodigestión. Posee una alta disponibilidad de nutrientes para la planta, es rico en hormonas vegetales promotoras y fortalecedoras del crecimiento (disminuye el requerimiento de nutrientes por parte de las plantas). Se aplica generalmente en la papa, el algodón, uva, maíz, espárrago y fresa. Sus ventajas son:

- Permite mejor intercambio catiónico en el suelo (mejora drenaje y retención).
- Puede aplicarse por rociado, con el agua de riego.
- Fuente de fitorreguladores, por lo que sirve para el enraizamiento, acción sobre el follaje y poder germinativo.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades del biol utilizando estiércol de vaca como sustrato:

| Composición físico-química Biol | |
|---|---|
| pH | 7,8 |
| Materia Seca | 4,18% |
| Nitrógeno total | 2,63 g/kg |
| NH4 | 1,27 g/kg |
| Fósforo | 0,43 g/kg |
| Potasio | 2,66 g/kg |
| Calcio | 1,05 g/kg |
| Magnesio | 0,38 g/kg |
| Sodio | 0,404 g/kg |
| Ácido indol acético | 9,0 ng/g |
| Giberelina | 8,4 ng/g |
| Purinas | 9,3 ng/g |

*Tabla 4.2.1-1. Composición del biol*

### 4.2.2 Biosol

El biosol es la fracción sólida del fango, muy similar al compost orgánico. Así como el biol, su composición está íntimamente relacionada con el tipo de sustrato utilizado en la biodigestión. El mismo se puede utilizar solo o mezclado con compost o fertilizantes sintéticos. Comúnmente se utilizan de 2 a 4 toneladas por hectárea, y se puede incorporar al suelo antes de la siembra (profundidad entre 10 y 20 cm). Sus ventajas son:

- Mejora la calidad del suelo y permite un uso intensivo del mismo.
- Mejora la estructura de suelos arenosos.

- Mejora la retención de la humedad, favoreciendo la actividad biológica.
- Mejora la porosidad.
- Reduce la necesidad de abono.

A continuación se muestra una tabla con la composición del biosol utilizando estiércol de vaca como sustrato:

| Composición físico-química Biosol | |
|---|---|
| pH | 7,6 |
| Materia Seca | 85 % |
| Nitrógeno total | 2,7 % |
| Fósforo P2O5 | 1,6 % |
| Potasio K2O | 2,8 % |
| Calcio CaO | 3,5 % |
| Magnesio MgO | 2,3 % |
| Sodio Na | 0,3 % |

*Tabla 4.2.2-1. Composición del biosol*

# 5 LOS BIODIGESTORES

Un biodigestor es un contenedor (llamado reactor) herméticamente cerrado y destinado a realizar un manejo adecuado de residuos orgánicos, en donde se los descompone y se los trata por medio de la actividad de bacterias anaeróbicas para generar biogás. Este recipiente está conectado a un caño de entrada o de carga de materias primas orgánicas y otro de salida o de materias orgánicas estabilizadas.

Los materiales orgánicos se ponen a fermentar con cierta cantidad de agua, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en fósforo, potasio y nitrógeno. Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidropresión y postratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor.

En general son construidos sobre cemento y una sección de los mismos (o su totalidad) es enterrada bajo tierra para limitar la pérdida de calor. En la parte superior del digestor se construye una campana de cierre hidráulico con el agua del efluente que permite la recolección de gas, el cual será almacenado en un gasómetro para su posterior utilización.

En cada producción es necesario cargar el digestor con material orgánico, ya sea por única vez al principio del ciclo de producción o bien de manera continua durante el período de funcionamiento. En cada tipo de digestor, las deyecciones deben ser introducidas junto con un efluente líquido. Tal efluente provoca que las bacterias anaeróbicas se encuentren en un medio ausente de oxígeno libre.

El modo de llenado puede variar entre un llenado completo o paulatino, mientras se espera la finalización del ciclo de fermentación para iniciar el vaciado del digestor. Todo este proceso trae aparejado en cada caso un tiempo de estabilización, en el cual los parámetros fundamentales (pH, temperatura, etc.) tienen a llegar a los valores necesarios para el proceso.

Los biodigestores también suelen contar con tuberías de extracción de lodos, colocadas sobre bloques a lo largo del suelo inclinado -para un drenaje más efectivo- del digestor. Estas tuberías van equipadas con válvulas tapón para evitar obstrucciones y se utilizan para llevar periódicamente el lodo del digestor a un sistema de evacuación de lodos.

## 5.1 Clasificación de los biodigestores

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por

lotes y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación. Resulta conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en los siguientes tipos:

### 5.1.1 Biodigestores continuos

La materia orgánica entra de forma regular por uno de los extremos, mientras que el compostaje producto de la fermentación es extraído por el extremo opuesto.

Asimismo, las bacterias presentes en el reactor son ingresadas en forma continua con la carga, y la temperatura interna del reactor debe mantenerse constante. Para obtener una mezcla homogénea, es conveniente mezclar materia prima del reactor con el fin de que estén distribuidas en toda la masa.

En un digestor continuo, es necesario que la materia introducida esté compuesta con la menor parte de fibras vegetales posibles, ya que estas tienden a permanecer en la superficie del líquido, formando capas o costras de difícil eliminación.

Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.

### 5.1.2 Biodigestores semicontinuos

Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor Hindú y el Chino.

### 5.1.3 Biodigestores discontinuos o de tipo Batch

Los digestores discontinuos tienen un funcionamiento cíclico, a diferencia de los continuos, que presentan un funcionamiento de régimen constante. Como en este

caso la producción de gas no es continua, se suele construir más de un biodigestor, cargándolos en forma alterada para obtener un suministro de gas lo más constante posible.

Inicialmente, se carga la materia prima. Luego, en el interior del reactor comienza la etapa de fermentación, en la que se producen las transformaciones biológicas. Finalizado el proceso se vacía el digestor y el sistema está listo para una nueva carga y así iniciar un nuevo ciclo.

En el caso de los digestores discontinuos, la presencia de fibras vegetales no es un inconveniente debido a que las mismas aumentan la producción de biogás y la eventual formación de costras superficiales no genera problemas ya que en la etapa final de vaciado serán removidas.

Este sistema discontinuo es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materias primas que presentan problemas de manejo en un sistema semi continuo y continuo, o materiales difíciles de digerir metanogénicamente o cuando las materias primas a procesar, están disponibles en forma intermitente, como es el caso de los rastrojos de cosecha.

Está destinado a pequeñas y grandes explotaciones agropecuarias; su uso a escala doméstica es poco práctico. Sus principales ventajas son las siguientes:

1. Ocupa menor volumen de digestor por volumen de biogás producido, debido a la alta concentración de materia seca en el sustrato (40 – 60%) y consume 60 – 80% menos de agua que los digestores continuos y semi continuos.

2. No forma costra ni necesita agitación diaria.

3. No sufre cambios de temperaturas violentos.

4. Ocupa menos mano de obra, ya que no necesita carga diaria, sino cada 2 o 3 meses para carga y descarga. Durante el resto del tiempo, basta amontonar el material a usar.

5. La mayor parte del biofertilizante se obtiene en forma sólida, siendo más fácil de esparcirlo en la preparación de suelos.

6. Se puede construir sobre el suelo o semi enterrado. Es ideal para localidades de nivel freático superficial o terreno en rocas

## 5.2 Tipos de biodigestores

La elección del tipo de biodigestor a utilizar se encuentra sujeta al sistema existente de manejo de residuos que cuenta el establecimiento rural y al tamaño del mismo. El biodigestor debe estar diseñado para operar en conjunto con todos los procesos llevados a cabo en la instalación.

### 5.2.1 Pozo séptico

Es el tipo de biodigestor más antiguo y sencillo que se conoce. Utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas.

Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes, ya que estos últimos tienden a inhibir la acción metabólica de las bacterias, razón por la cual los pozos se colman con rapidez y dejan de operar, haciendo que se requiera destaparlos frecuentemente. En el caso de que sea imposible separar las aguas negras de las jabonosas, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua a fin de solucionar el problema, antes de iniciar la fermentación anaeróbica.

### 5.2.2 Biodigestor de laguna cubierta

Son utilizados para tratar excremento líquido con concentraciones de sólidos menores al 3% (es necesario diluir el estiércol). Por lo general, se requieren de grandes volúmenes de agua para alcanzar esa concentración deseada. 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).

La principal ventaja de los digestores de laguna cubierta es la falta de necesidad de calentamiento y su bajo nivel de tecnología, lo que facilita su mantenimiento y disminuye sus costos. Sin embargo, este tipo de digestores está más destinado a la descomposición de los residuos que a la generación de energía, ya que surge como principal desventaja 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. Por ello, la generación de biogás es variable en función de las condiciones climáticas, por lo que no se puede contar con una generación constante de metano mediante este proceso.

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 primera laguna, 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.

Hay dos tipos de coberturas para estas lagunas: completa (bank-to-bank) y modular. La cubierta completa se utiliza en regiones donde ocurren fuertes precipitaciones, mientras que los cobertores modulares sirven para las regiones áridas.

### 5.2.3 Biodigestor de domo flotante o Hindú

El biodigestor hindú fue desarrollado en la India después de la Segunda Guerra Mundial en los años 50. Surgió por necesidad ya que los campesinos necesitaban combustible para los tractores y calefacción para sus hogares en época de invierno. Luego, cuando terminó la guerra se volvió a conseguir combustibles fósiles por lo que dejaron los biodigestores y volvieron a los hidrocarburos. Como India es pobre en combustibles se organizó el proyecto KVICK (Kaddi Village Industry Commision) de donde salió el digestor Hindú y el nombre del combustible obtenido conocido como biogás. Este digestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación.

Este biodigestor consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás, que sube y baja dirigida por una guía central. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 30cm de columna de agua. Tal como se mencionó, con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. El reactor se alimenta en forma semi-continua a través de una tubería de entrada.

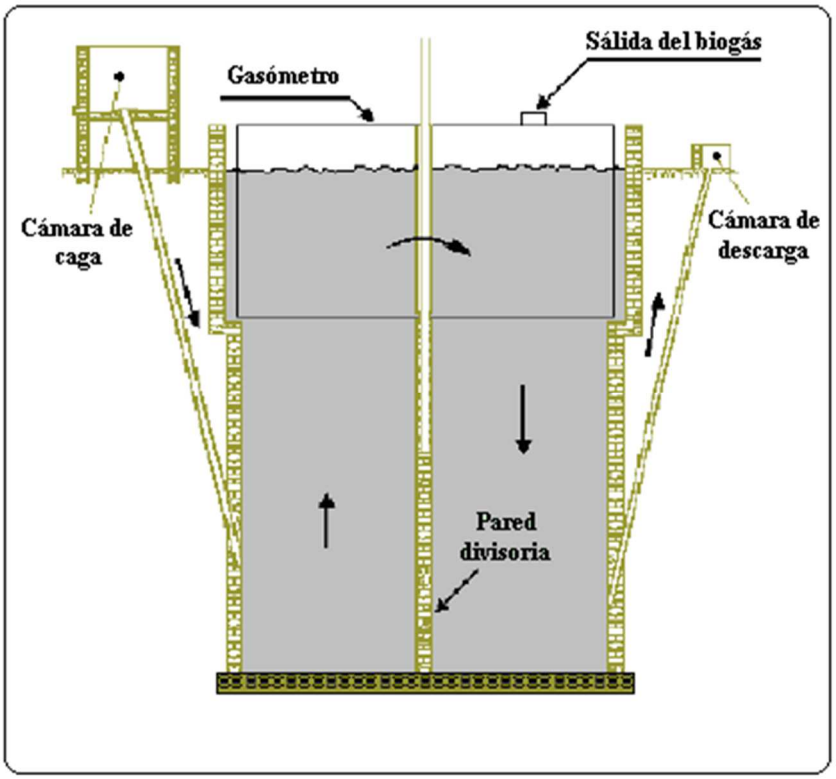


*Figura 5.2.3-1. Estructura de un biodigestor de domo flotante o Hindú*

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. Para aumentar la retención de la materia prima, posee un tabique central. En este caso, los materiales usados son preferentemente excretas, las que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente.

Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día.

### 5.2.4 Biodigestor de domo fijo o Chino

El biodigestor chino fue desarrollado al observar el éxito del biodigestor Hindú. El gobierno chino adaptó esta tecnología a sus propias necesidades, ya que el problema en China no era energético sino sanitario. Los chinos se deshicieron de las heces humanas en el área rural y al mismo tiempo obtuvieron abono orgánico. Con el biodigestor se eliminaban los malos olores y al mismo tiempo se obtenía gas para las cocinas y el alumbrado. El biodigestor chino funciona con presión variable ya que el objetivo no es producir gas sino el abono orgánico (biofertilizante) ya procesado.

Este tipo de biodigestor no tiene campana flotante, si no techo fijo para le recolección de biogás y se construye totalmente enterrado. El reactor consiste en una cámara de gas firme construida de ladrillos, piedras u hormigón. Son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. En este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegándose a alcanzar presiones internas de hasta 1m de columna de agua. Se generan entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores

La tubería de la entrada es recta y los extremos son nivelados. Hay un tapón de la inspección a la cima del digestor que facilita el limpiado. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor, aunque esta instalación tiene como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar a 20 años de funcionamiento), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

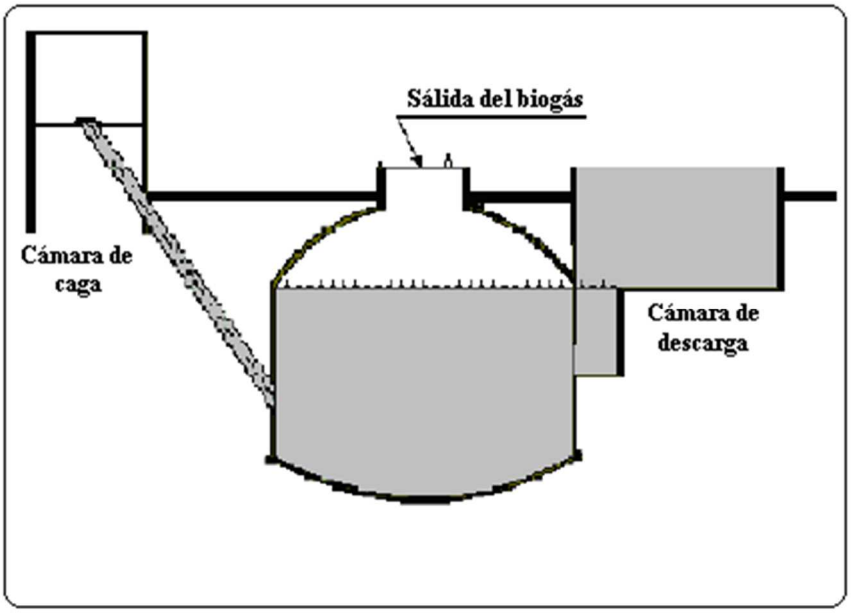


*Figura 5.2.4-1. Estructura de un biodigestor de domo fijo o Chino*

Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta y una o dos veces al año el digestor se vacía completamente aplicando el residuo (sólido) a los campos de cultivo. A pesar que el digestor chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general largos y además se tiene gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con el suelo antes de la siembra. Los tiempos de

retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días, requiriéndose para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 de este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú

### 5.2.5 Biodigestor de estructura flexible

Los biodigestores de estructura flexible están hechos de materiales más económicos que los construidos en base a una estructura fija. Tal es el caso del nylon, el neopreno, el PVC y el polietileno.

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con material orgánico en fermentación; luego la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.

Este sistema posee una mayor área superficial por lo que resulta muy eficiente. Es deseable que el biodigestor este aislado y cuente con un dispositivo de calentamiento y de agitación. Un mecanismo bueno es la construcción de una pared de tierra en la parte norte del biodigestor para prevenir el enfriamiento a causa de los vientos, y en el lado sur un colector solar simple para la calefacción, con el fin de mantener la temperatura del fermentador constante. La bolsa de almacenamiento de gas puede incorporarse al digestor o estar independiente.

Sus componentes son:

- Tubo de admisión: es un tubo de plástico de 20 a 30 cm de diámetro, que debe usarse para la admisión de desechos y debe sumergirse en los residuos al menos a 15 cm de profundidad, lo cual previene el escape del metano.

- Fermentador y bolsa de almacenamiento: este es el principal componente del biodigestor y la bolsa de almacenamiento está en la parte superior del biodigestor. El tamaño del fermentador depende de la cantidad de desechos a fermentar por metro cúbico. Si la cantidad de desechos a tratar es elevada, se pueden conectar cámaras múltiples por medio del tubo plástico.

- Tubo del afluente: el diámetro del tubo debe ser de 4 a 6 pulgadas de material de plástico. Este se localiza por debajo del tubo de entrada en el lado opuesto del digestor, el tubo del afluente también debe ser sumergido a 15 cm de profundidad del fermentador para prevenir el escape del gas.

- Tubo de metano: este tubo, que se ubica en la parte de la bolsa de almacenamiento de metano, debe tener 2 pulgadas de diámetro y se usa para transportar el biogás a su lugar de uso. El tubo posee una salida que está sumergida en agua y que drena la humedad condensada.

- Dispositivo de seguridad: este se utiliza para prevenir la ruptura del fermentador debido a presiones altas de la fermentación anaeróbica de los desechos. Consiste en una botella de al menos 10 cm de profundidad insertada en el tubo de salida. Cuando la presión del digestor es mayor a la del agua, se libera el biogás.

- Tubo de limpieza: el lodo que se sedimenta en el fondo del biodigestor debe ser removido cada dos años. La tubería sirve para evacuar estos lodos por bombeo.

Entre las desventajas del biodigestor de plástico se halla su bajo tiempo de vida útil, lo que hace necesario montar una nueva instalación cada tres años. También es muy vulnerable a sufrir roturas por condiciones climáticas adversas, por las acciones del hombre y los animales. En el caso de presentarse roturas, estas pueden ser reparadas usando un adhesivo fuerte. La parte reparada debe permanecer seca hasta su endurecimiento por completo.

*Figura 5.2.5-1. Biodigestor de estructura flexible*

### 5.2.6 Biodigestores mixtos: tanque de almacenamiento de piedra y campana de polietileno

Existen también los biodigestores mixtos que combinan el tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo (como los empleados en los dispositivos tradicionales) con una estructura semiesférica de polietileno de película delgada, en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija. Este tipo de instalación tiene como ventaja el hecho de ser más económica que los sistemas tradicionales (lográndose haber disminuido hasta un 30% los costos respecto a los prototipos tradicionales) y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil.

*Figura 5.2.6-1. Biodigestor mixto: tanque de piedra y campana de polietileno*

### 5.2.7 Biodigestor de Mezcla Completa

Las instalaciones industriales emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado. Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento construidos de ladrillos, hormigón o acero, entre otros.

Son tanques que están instalados sobre el suelo (con una base firme por debajo del mismo), diseñados para tratar residuos con una concentración de sólidos de 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 necesario brindarles una fuente de calor. La agitación se puede realizar por procedimientos mecánicos, por circulación del gas o del líquido.

La materia orgánica se deposita en un tanque de mezcla donde se le agrega agua para llegar a una concentración objetivo deseada. A partir de ahí, el efluente pasa al biodigestor donde se mezcla homogéneamente con las sustancias allí presentes, con lo cual se termina consiguiendo una actividad bacteriológica constante en todo el contenedor.

Para optimizar el funcionamiento, se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los biodigestores, y el biofertilizante de los

digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión de los tanques de almacenamiento de biogás con el fin de proporcionar del mismo a todos los puntos de distribución instalados.

El biodigestor de mezcla completa es un sistema adecuado para el tratamiento de efluentes con un alto contenido en materia orgánica, como el caso de los residuos ganaderos. En la mayoría de los modelos parte del biogás producido es destinado a calentar el biodigestor mismo. Además, se le puede añadir un generador a gas para conectarlo a la energía eléctrica.

*Figura 5.2.7-1. Biodigestor de Mezcla Completa*

### 5.2.8 Biodigestor de film

Consiste en un tanque en el cual hay películas de plástico llamadas biofilm, las cuales contienen una fina capa de bacterias anaeróbicas. A medida que los residuos pasan por este medio, se va produciendo biogás. Los digestores de film están diseñados para trabajar con residuos diluidos (operan con una concentración de sólidos del 3% aproximadamente, por eso es necesaria la utilización de un separados 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 menores (alrededor de 3 días). Esto posibilita un manejo intensivo del efluente a ser tratado.

## 5.3 Ventajas del uso de biodigestores en establecimientos agropecuarios

- Preserva el medio ambiente y la salud pública en las granjas, pues controla muy bien los malos olores, las moscas y la emisión de gases del efecto invernadero.
- Evita la contaminación de las fuentes de agua por las aguas residuales no tratadas, ya que las aguas de limpieza de los corrales son vertidas dentro del biodigestor para convertirse en fertilizantes líquidos de alta calidad.
- Mejora la salud de la población de la granja ya que al cocinar con biogás evita el humo de la leña y de las moscas que se crían en el estiércol almacenado al aire libre.
- El productor agropecuario se apropia de una tecnología sencilla que le produce ingresos extras al transformar residuos orgánicos en energía renovable. Y la fermentación anaeróbica transforma el estiércol de animales en un fertilizante orgánico de mejor calidad que el estiércol mismo.
- El biofertilizante que se genera con la biodigestión anaeróbica produce mejoras en las tierras agrícolas elevando la productividad de las mismas, y genera utilidades extras a quienes tienen biol disponible para su venta.
- La inversión en la compra e instalación de un biodigestor, retorna rápidamente por el ahorro en combustibles derivados del petróleo, y ahorro en la adquisición de fertilizantes químicos.
- El uso del biol y biosol mejora la calidad de la tierra y eleva la productividad en los cultivos.

### 5.3.1 Utilización del biofertilizante

Respecto al uso y valorización de los productos de la biodigestión (biofertilizante y biogás), existen todavía algunos puntos pendientes. Ya es sabida la gran importancia del biogás como sustituto de insumos básicos familiares, pero con respecto al biofertilizante existe la necesidad de definir más exactamente cuáles son sus beneficios y las posibilidades de aplicación y tratamiento (secado), para poder así abrir un mercado.

#### *5.3.1.1 Producción de biofertilizante*

La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás. Pero por otro lado quedará un líquido ya digerido, que ha producido todo el biogás que podía, y que se convierte en un excelente fertilizante. Para producir un mejor fertilizante es interesante aumentar los tiempos de retención, de manera que el lodo se descomponga más, y sea de mayor calidad y más fácil de asimilar por las plantas. El fertilizante que sale de un biodigestor con los tiempos de

retención expresados en la siguiente tabla es muy bueno, pero si aumentamos estos tiempos de retención en un 25% es excelente.

| Región característica | Temperatura | TRH |
|---|---|---|
| **Trópico** | 30 | 25 |
| **Valle** | 20 | 37 |
| **Altiplano** | 10 | 75 |

*Tabla 5.3.1-1*

Aumentar el tiempo de retención implica un mayor volumen del biodigestor y por tanto un mayor coste en materiales

#### *5.3.1.2 Aplicaciones del biofertilizante*

Existen diferentes experiencias en el uso del biol producido en un biodigestor y aquí se presentarán tres de ellas básicas 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 grano 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 ya comienza el fruto a aparecer, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta.

Por ello, mientras tanto, al biol se lo va a acumular en un recipiente cerrado y luego se lo va a utilizar como fertilizante en toda la extensión de la chacra, sustituyendo las eventuales semillas de pastura que anteriormente el campesino utilizaba para agregarle valor al suelo y obtener en corto tiempo una mayor ganancia de peso para sus animales.

#### *5.3.1.3 Comercialización del biofertilizante producido*

El caso de estudio, explicado al final del trabajo, estará orientado a la instalación de la tecnología de biodigestores para la posterior producción y comercialización de biofertilizante.

### 5.3.2 Energía demandada y animales requeridos

Antes de proceder a la selección del tipo de biodigestor a utilizar en el establecimiento rural, es necesario estimar la demanda energética y el potencial de producción de biogás y biofertilizante a partir de la cantidad de cabezas de ganado y de su forma de manejo, con

el objetivo de calcular cuál es la cantidad mínima de residuos que permite producir las cantidades requeridas de biogás y biofertilizante para cubrir las necesidades planteadas.

Además, se debe tener en cuenta que los desechos se incorporan al biodigestor diluidos en agua. La cantidad de agua a agregar dependerá de la cantidad de sólidos totales de los residuos orgánicos y del tipo de carga, es decir, si se opera con cargas diarias (semi continuas) o con sistemas estacionarios (discontinuos o batch).

#### *5.3.2.1 Estiércol disponible*

La materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). El ganado bovino tiene la característica de producir gran cantidad de excreta por animal y por tanto es más fácil de recoger.

De manera general, hay que calcular cuánto estiércol se dispone al día. Para ello hay que considerar el manejo del ganado que se realiza, ya que si es de pastoreo, el ganado duerme en la noche en un corral cercano a la vivienda, y solo se podrá recoger el 25% del estiércol producido por animal a lo largo del día. En caso de que el ganado esté encerrado todo el día cerca de la vivienda, todo el estiércol producido está disponible para ser introducido en el biodigestor. Se recomienda usar el estiércol necesario para la producción de biogás requerida, y dejar el sobrante para los usos tradicionales de abonado de los cultivos.

#### *5.3.2.2 Carga de mezcla diaria de entrada*

Todos los días hay que cargar el biodigestor con una carga de estiércol mezclada 1:4 con agua. De esta manera, una parte es de estiércol y cuatro de agua. A esto se le llama mezcla de carga diaria (estiércol más agua). En el caso de estiércol de ganado bovino, una mezcla de 1:3 también cumple los requisitos. En biodigestores tipo chino la mezcla se realiza 1:1, pero en biodigestores tubulares conviene diluir mucho más el estiércol de forma 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 en su interior.

#### *5.3.2.3 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.

#### *5.3.2.4 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 se considera el biodigestor vacío inicialmente y se comienza a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado en llenarse. De esta manera, cuando se cumpla "tiempo de retención +1 día" de 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.

#### *5.3.2.5 Volumen gaseoso*

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaeróbica (en ausencia de oxígeno) 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.

## 5.4 Consideraciones para definir la localización de un biodigestor

La elección del sitio donde se ubicara el digestor es de gran importancia pues incidirá en el éxito o fracaso de la operación del sistema. Hay que tener en cuenta las siguientes premisas para escoger el lugar adecuado:

- Materia prima accesible y agua requerida suficiente para efectuar la carga diaria.
- Debe estar cerca del lugar donde se consumirá el gas, pues las tuberías pueden resultar caras y otro detalle no menor es que las presiones obtenibles no permiten el transporte a distancias mayores de 30 metros.
- Debe estar en un lugar cercano al de almacenamiento del efluente (biofertilizante) y con una pendiente adecuada para facilitar el transporte y salida del mismo.
- Facilidad para el empleo del estiércol o su almacenamiento en caso de ser necesario. Se debe encontrar cerca del lugar donde se recogen los desperdicios para evitar el acarreo que tarde o temprano atentará contra una operación correcta del biodigestor, e implicara mayores costos.
- Topografía del sitio, así como las características del suelo y los niveles de las aguas subterráneas. El suelo debe ser firme, cualquier material destacándose como

piedras afiladas o raíces debe quitarse. Una trinchera debe situarse de manera que pueda desviar el agua de lluvia y acomodar a su lado al tubo de plástico.

- Debe estar a por lo menos 10 – 15 metros de cualquier fuente de agua para evitar posibles contaminaciones.
- Debe ubicarse preferentemente protegido de vientos fríos y donde se mantenga relativamente estable la temperatura, tratando de que reciba el máximo de energía solar.

## 5.5 Selección de la tecnología del biodigestor en función del nivel de producción de biogás y biofertilizante

Esta decisión debe tomarse teniendo en cuenta algunos criterios tales como:

- Inversión que se está dispuesto a realizar.
- Energía que se quiere obtener.
- La biomasa con que se cuenta para alimentar el digestor.
- El tamaño requerido del biodigestor.
- Las características del lugar en cuanto a profundidad del nivel freático o mantos rocosos.

Para bajos niveles de producción de biogás y biofertilizante se recomienda la utilización de un biodigestor tubular de polietileno; en el caso de medianos, es preferible emplear un biodigestor de laguna cubierta con campana de PVC. Finalmente, para producir biogás en escala industrial habría que instalar un biodigestor de mezcla completa. Los otros tipos de biodigestores expuestos anteriormente y no mencionados en esta última categorización, tales como el biodigestor Hindú o Chino, quedan presentados a modo informativo en el trabajo pero no se va a profundizar en ellos porque se considera a los tres destacados como los más convenientes para cada volumen de producción por su mayores facilidades de instalación y menores costos de materiales asociados.

En línea con el objetivo de este trabajo, el análisis se enfocará en las necesidades de pequeños y medianos productores agropecuarios y cómo la tecnología de biodigestores puede generarles un ahorro energético en sus campos y hasta producirles ingresos adicionales a partir de la comercialización de biogás y biofertilizante remanente que no fue consumido por el productor agropecuario. De esta manera, a continuación se va a profundizar el análisis del dimensionamiento, instalación, costos asociados y ahorro energético generado por los dos biodigestores asociados a este tipo de necesidades:

- Biodigestor tubular de polietileno.

- Biodigestor de laguna cubierta con campana de PVC.

## 5.6 Biodigestor tubular de polietileno

Este biodigestor de bajo costo ha sido desarrollado y está ampliamente implementado en países del sudeste asiático, pero en América Latina, solo países como Cuba, Colombia y Brasil tienen desarrollada esta tecnología. Este modelo de biodigestor familiar, construido a partir de mangas de polietileno tubular, se caracteriza por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción. Por ello se considera una tecnología apropiada para bajos niveles de producción de biogás.

Las familias dedicadas a la agricultura, suelen ser propietarias de pequeñas cantidades de ganado (dos o tres vacas por ejemplo) y pueden, por tanto, aprovechar el estiércol para producir su propio combustible y un fertilizante natural mejorado. Se debe considerar que el estiércol acumulado cerca de las viviendas supone un foco de infección, olores y moscas que desaparecerán al ser introducido el estiércol diariamente en el biodigestor familiar. También es importante recordar la cantidad de enfermedades respiratorias que sufren, principalmente las mujeres, por la inhalación de humo al cocinar en espacios cerrados con leña o bosta seca. La combustión del biogás no produce humos visibles y su carga en ceniza es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera.

### 5.6.1 Descripción de los componentes del biodigestor

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 anaeróbicas.

El film de polietileno tubular se amarra por sus extremos a tuberías de conducción, de unas seis pulgadas de diámetro, con tiras de goma elástica recicladas de las cámaras de las ruedas de los autos. Con este sistema, calculando convenientemente la inclinación de dichas tuberías, se obtiene un tanque hermético. Al ser flexible el polietileno tubular es necesario construir una 'cuna' 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 de 1:4 o 1:3 según el tipo de estiércol). En el biodigestor se alcanza finalmente un equilibrio de nivel hidráulico, por el cual, tanta cantidad de estiércol mezclado con agua es agregada, tanta cantidad de fertilizante sale por la tubería del otro extremo.

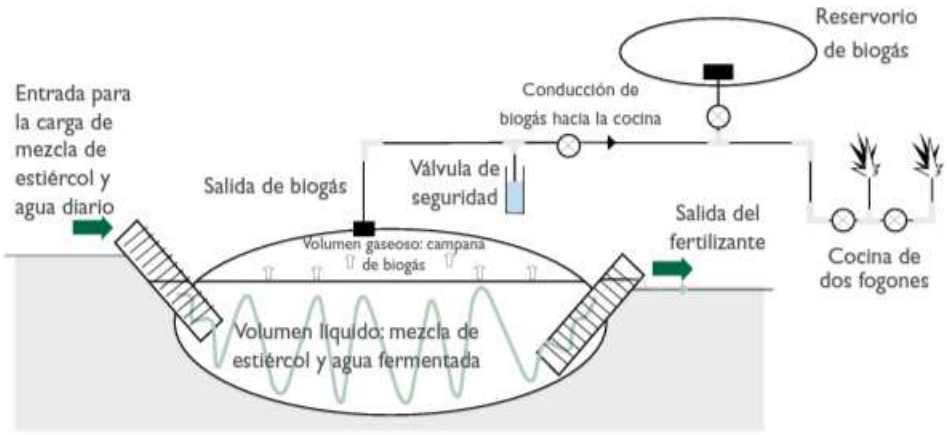


*Figura 5.6.1-1. Esquema del sistema completo del biodigestor familiar*

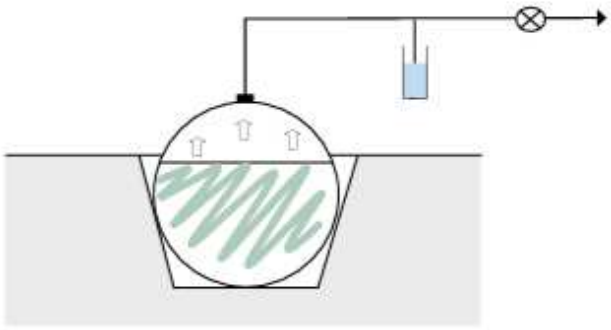

*Figura 5.6.1-2. Corte transversal de un biodigestor*

En la figura 5.6.1-2 se ve que la zanja donde se ubicará tiene forma de chanfle (paredes inclinadas) y éstas soportan la parte del volumen líquido, quedando la campana de biogás arriba. Dependiendo del ancho de rollo (del diámetro de la manga) la zanja tendrá unas dimensiones diferentes.

Debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la cámara hermética, las bacterias anaeróbicas contenidas en el propio estiércol comienzan a digerirlo. La conducción de biogás hasta la cocina se hace de manera directa, manteniendo todo el sistema a la misma presión: entre 8 y 13 cm de columna de agua dependiendo la altura y el tipo de fogón. Esta presión se alcanza incorporando en la conducción una válvula de seguridad construida a partir de una botella de refresco. Para hacerla se incluye una “T” en la conducción, y mientras sigue la línea de gas, al tercer extremo de la T se le conecta una tubería que se introduce en el agua contenido en la botella unos 8 a 13 cm. También se añade un reservorio, o almacén de biogás, en la conducción, permitiendo almacenar unos 2 a 3 metros cúbicos de biogás.

*Figura 5.6.1-3. Cocina metálica adaptada para funcionar con biogás*

Los costos en materiales de un biodigestor de este tipo pueden ir de 130 a 150 dólares; los materiales y el presupuesto estimado por cada componente se detallarán más adelante.

Este modelo está específicamente desarrollado para pequeñas unidades rurales y, si bien es un diseño de baja durabilidad (su vida útil ronda los 6 a 10 años), su bajo requerimiento de inversión permite un acercamiento inicial por parte de pequeños productores a este tipo de tecnologías. En el caso de que en un futuro haya otras fuentes de financiamiento o mayor disponibilidad de acceso a créditos entonces se podría optar por materiales más durables para el biodigestor: alto densidad polipropileno, PVC, etc.

El tamaño del digestor quedará determinado en función de las cargas diarias y del período óptimo de fermentación. Este último parámetro dependerá de la temperatura media de la zona, así como de las variaciones de temperaturas diarias.

Otras ventajas del biodigestor tipo tubular de plástico respecto a otros biodigestores de disposición fija se exponen a continuación:

- Mayor rapidez en la detección de eventuales fugas de gas.
- Facilidad de transporte de los materiales para su instalación.

- Beneficios técnicos del flujo horizontal: mayor eficiencia biológica y menores "cortocircuitos".

A continuación, se analiza parte por parte el biodigestor tubular. Por ello se empezó con el tema de la **entrada**. Se concluyó que la poza de cemento en la entrada es una buena solución para los modelos familiares porque:

- Ayuda a preparar la mezcla.
- En casi todos los pequeños establecimientos rurales hay cultura de uso del cemento, aunque también se puede hacer con barro mejorado o con greda.
- Se le puede añadir un filtro, para evitar la entrada de sólidos mayores de un cierto tamaño (en particular paja y materiales fibrosos).

Respecto a las tuberías de entrada y salida, resulta importante dotar al digestor con una salida para los lodos sedimentados. Lo mismo puede afirmarse para la decisión de poner la tubería de entrada a la altura de un 1/3 de la fase liquida para poder aumentar la agitación en el momento de la alimentación.

En cuanto al **material**, en este caso el polietileno, se sacan las siguientes conclusiones:

- El polietileno ordinario presenta una escasa resistencia a la radiación solar, degradándose rápidamente (menos de un año si expuesto directamente al sol). Resultados mejores se obtienen usando polietileno para invernaderos, que contiene aditivos para disminuir la velocidad de degradación: puede considerarse un mínimo de tres años garantizados. En ambos casos se puede mejorar grandemente la duración del plástico (al menos del doble de duración) si disponemos el digestor a la sombra o bajo una cobertura que filtre la radiación UV.
- El polietileno no permite operaciones de soldadura o pegado, obligando así a las operaciones de amarre de los tubos carga y descarga mediante ligas de neumáticos. Es una manipulación que puede llevar a errores de instalación: rupturas en el plástico, deformación de las tuberías de carga y descarga por exceso de tensión de las ligas de neumáticos, etc.
- No es sencillo parchar eventuales huecos en el material.

Se considera que el uso de polietileno para biodigestores tubulares ha cumplido una misión de vanguardia, frente a modelos rígidos en concreto y ladrillos; pero los inconvenientes que presenta causan un alto número de rupturas y abandono de los sistemas, disminuyendo su vida media útil y así disminuyendo la rentabilidad de la inversión económica. Por esta razón se propone como alternativa para futuros proyectos

con mayor grado de financiamiento el uso de materiales de alta densidad polipropileno y el PVC, puesto que:

- Disponen de una mayor robustez y menor fragilidad en las operaciones de transporte e instalación;
- Es posible centralizar ciertas fases de la producción (disposición de los tubos de carga y descarga, salida de gas), mejorando el control de calidad y facilitando las sucesivas operaciones de instalación;
- presentan una mayor vida útil (10 a 20 años) y posiblemente una mayor rentabilidad económica respecto a los modelos en polietileno, a pesar de un mayor costo inicial.

En el caso del polietileno es posible alcanzar buenos resultados si se hace hincapié sobre la apropiación social de la tecnología, capacitando al dueño de la chacra para que sea consciente del cuidado que requiere el biodigestor, el cual consiste en protegerlo contra la radiación solar directa, las inundaciones, contra los propios animales ubicados en el establecimiento, etc.

Un dato importante que debería plantearse en la fase de diseño es el tiempo de vida útil deseado para el digestor. Algunos fenómenos migratorios hacia las zonas urbanas o hacia otras zonas productivas pueden limitar la importancia de diseñar un digestor con una alta vida útil. Por lo tanto, se ha concluido que al menos 10 años de vida útil representan la meta de diseño.

### 5.6.2 Dimensionamiento del biodigestor

El diseño del biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. Como se dijo anteriormente, la temperatura 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. 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.

#### *5.6.2.1 Temperatura y TRH*

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias

metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70 °C de temperatura, 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 5ºC se puede decir que las bacterias quedan 'dormidas' y ya no producen biogás.

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. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

#### *5.6.2.2 Dimensionamiento de un biodigestor familiar*

Conociendo el volumen total de un biodigestor se deberá determinar las dimensiones del mismo. Las principales dimensiones a determinar son la longitud y radio del biodigestor tubular.

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, 2, 3 y 4 metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico y determina el diámetro y radio del biodigestor.

Normalmente este plástico se usa para invernaderos, 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 se amarran ambos extremos de la manga.

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 8. 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 8. Esta relación es flexible en un rango de 5-10, siendo la mejor 8.

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 de la zanja queda determinada por la longitud del biodigestor y la profundidad y ancho de la misma dependerán del ancho de rollo empleado en la construcción del biodigestor.

De forma general, se puede emplear las siguientes dimensiones para la zanja:

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 lo tanto, se estará reduciendo el tiempo de retención.

Equilibrio hidráulico

El biodigestor tubular es de flujo continuo, y por lo tanto no es necesario vaciarlo normalmente a lo largo de su vida útil. Se produce un equilibrio hidráulico por el que cada día al realizar la mezcla de carga por la entrada, desplazará el lodo interior, y rebosará por el otro extremo, la salida, la misma cantidad pero del material ya digerido.

De esta manera, el rebalse del lodo interior queda definido por la altura de la boca del tubo de salida. Si la boca de salida está por debajo de la profundidad estimada, se estará reduciendo la altura del lodo en el interior (y por lo 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, se estará aumentando el volumen líquido e impidiendo la formación de la cúpula superior que acumula gas.

Esquema de metodología de diseño

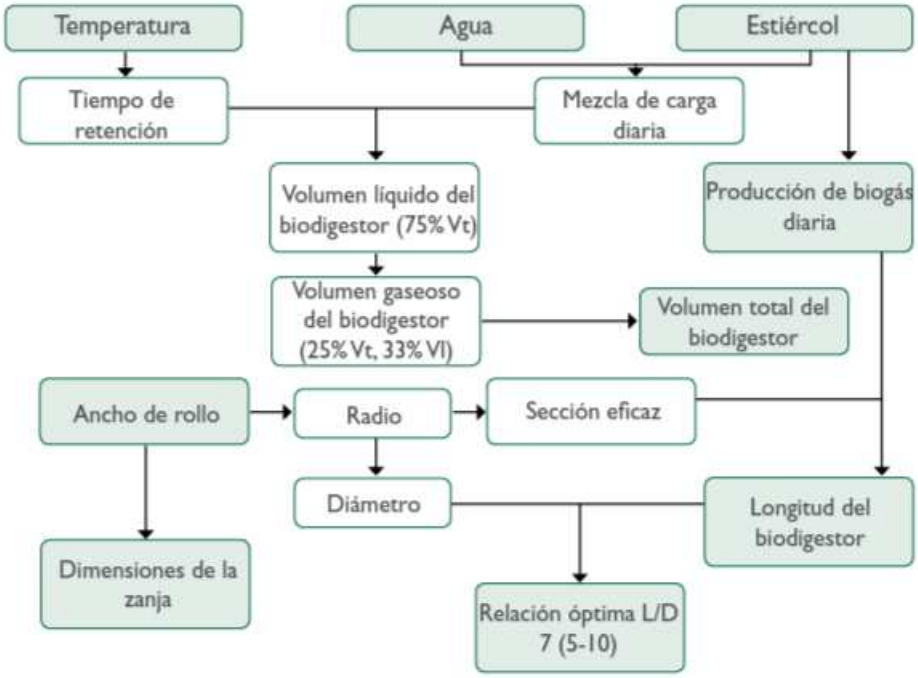


*Figura 5.6.2-1. Esquema de metodología de diseño*

Como criterio básico para un biodigestor familiar se ha considerado:

- Producción de biogás para 4-5 horas diarias de consumo en cocina.
- Producción mejorada de fertilizante.

Para producir biogás para 4-5 horas de cocina es necesaria una carga de 20 kg de estiércol fresco al día mezclados con 60 litros de agua. La producción mejorada de fertilizante se establece porque se han considerado tiempos de retención amplios para que los biodigestores funcionen bien en el abanico de temperaturas en el que han sido diseñados

**A. Biodigestores familiares de valle**

Regiones de valle se caracterizan por llegar a tener alguna helada durante el invierno, pero nunca varias noches seguidas. Son regiones donde la temperatura media está en torno a los 18-20ºC. En este caso no es necesaria una carpa solar. De hecho se deberán aprovechar zonas soleadas para que el sol ayude a calentar el terreno. Es necesario proteger el biodigestor del sol, pues de otra manera terminaría dañando el plástico y se puede emplear una media-sombra o un tejadillo, siempre ubicado en zonas soleadas.

### B. Biodigestores familiares de trópico

La región del trópico es la natural para los biodigestores. La validación y la difusión de los biodigestores han sido siempre en países tropicales. Esto es debido a la mayor temperatura ambiente, esto implica menor tiempo de retención, que influye directamente en el tamaño del biodigestor y por tanto los costes. En estas regiones tampoco hace falta una carpa solar, ni media sombra, es más, conviene proteger el biodigestor del sol con un tejadillo de calamina, aluminio u hoja de palma.

| Biodigestores modelo para 2 ecorregiones | | |
|---|---|---|
| Magnitud | Valle | Trópico |
| Carga diaria | 20 kg de estiércol bovino y 60 litros de agua mezclados | |
| Producción diaria de biogás | 700-750 litros (4-5 horas de cocina) | |
| Producción diaria de fertilizante (litros) | 80 litros | |
| Tiempo de retención (días) | 37.5 | 25 |
| Tiempo medio de demora en empezar a funcionar (días) | 30 | 21 |
| Temperatura de trabajo (°C) | 20 | 30 |
| Temperatura ambiente (°C) | 15-20 | 13-38 |
| Volumen líquido (litros) | 3000 | 2000 |
| Volumen gaseoso (litros) | 1000 | 666 |
| Volumen total (litros) | 4000 | 2666 |
| Ancho de rollo (m) | 1.5 | 1.25 |
| Longitud de biodigestor y zanja (m) | 5.6 | 5.3 |
| Relación L/D | 5.7 | 8.3 |
| Longitud plástico por capa (1m más para amarre) (m) | 6.6 | 6.3 |
| Plástico total (con reservorio) por biodigestor (m) | 16.2 | 15.6 |
| Ancho inferior de zanja (m) | 0.5 | 0.4 |
| Ancho superior de zanja (m) | 0.7 | 0.6 |
| Profundidad de zanja (m) | 0.8 | 0.7 |

*Tabla 5.6.2-1. Dimensionamiento biodigestores familiares modelo de valle y de trópico*

## 5.6.3 Materiales necesarios y costos estimados

El material más particular es el polietileno tubular, ya que normalmente se deberá pedirlo de 300 micrones de grosor, cuando éste se fabrica en 200 micrones para su uso en invernaderos. Además, ya que se pide su fabricación con mayor espesor (300 micrones), se exige un color “negro humo”, que se ha notado es más resistente a la radiación solar. Como ya se ha explicado en la “guía de diseño”, 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.

*Figura 5.6.3-1. Pasamuros o flange*

Otro material, que en algunos países ha sido más complicado de encontrar, son los "pasamuros" (o flanges). Simplemente es el accesorio de conducción que va a permitir que el biogás salga del interior del biodigestor, atravesando la doble capa, para que avance por la conducción. Este accesorio está compuesto por un macho y una hembra de rosca, con discos sólidos a modo de tuercas. El macho atravesará la doble capa de plástico desde el interior y la hembra se enroscará por encima. Apretando ambos se hará un "sándwich" que sellará el agujero que se ha hecho sobre la doble capa. Para que el sellado sea hermético, se emplearan discos de goma (que pueden ser hechos con cámaras de las ruedas de los autos) con un agujero central del tamaño del macho, que irán colocados entre los discos del "pasamuros" y la doble capa de plástico, aprisionándola entre ellos.

Por lo demás, los tubos de entrada y salida del biodigestor son tuberías de 6" de desagüe, normalmente en PVC. Se pueden emplear tuberías de cemento, pero son más pesadas y pueden romperse en su manipulación. El amarre entre estas tuberías y el polietileno tubular se hace con ligas hechas con cámaras de rueda de auto de unos 3 cm de ancho. La conducción de biogás se realiza en tubería PED (o 'politubo' o manguera de riego de PCV) de ½" pulgada, empleando codos y T´s de plástico. Se recomienda que las llaves sean de bola, ya que otras normalmente están pensadas para conducciones de riego y no serán totalmente herméticas cerradas para el biogás.

| Materiales y presupuesto estimado para biodigestores familiares modelo | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Material | | | Unidades por biodigestor | Precio unidad (USD/u) | Precio por biodigestor |
| Conducción de biogás | Tubería de PVC de 1/2 " (m) | | 25.00 | 0.65 | 16.25 |
| | Llaves de bola de 1/2 " de plástico | | 4.00 | 4.65 | 18.60 |
| | Flange 1/2 " de plástico | | 2.00 | 2.65 | 5.30 |
| | Codos PVC 1/2 " | | 4.00 | 0.20 | 0.80 |
| | Niple PVC 1/2 " | | 2.00 | 0.33 | 0.66 |
| | Tee PVC 1/2 " | | 4.00 | 0.33 | 1.32 |
| | Teflón | | 2.00 | 0.20 | 0.40 |
| Subtotal: Conducción de biogás | | | | | 43.33 |
| Cocina | Codo metálico 1/2 " | | 2.00 | 0.40 | 0.80 |
| | Tubos metálicos 1/2 " 12 cm | | 2.00 | 0.95 | 1.90 |
| | Tubos metálicos 1/2 " 7 cm | | 2.00 | 0.65 | 1.30 |
| Subtotal: Cocina | | | | | 4.00 |
| Biodigestor | Tubería PVC 6 " (m) | | 2.00 | 6.30 | 12.60 |
| | Liga de neumático (m) | | 60.00 | 0.20 | 12.00 |
| | Polietileno tubular (m) | Trópico (AR 1.25m) | 15.60 | 4.00 | 62.40 |
| | (300 micrones color negro humo) | Valle (AR 1.50m) | 16.20 | 4.85 | 78.57 |
| Subtotal: Biodigestor | | | | Trópico | 87.00 |
| | | | | Valle | 103.17 |
| Total | | | | Trópico | 134.33 |
| | | | | Valle | 150.50 |

*Tabla 5.6.3-1. Estructura de inversión modelo para biodigestores familiares de valle y de trópico*

Los fogones de la cocina, normalmente dos, se hacen con tuberías de ½" de hierro. No hace falta hornilla, ni nada para hacer la mezcla con el oxígeno de llama. Saliendo el biogás de una tubería de media pulgada, combustionará si es que se le acerca una llama. También se pueden adaptar a cocinas normales de garrafa.

Otros materiales adicionales que no tienen costo específico son: arena para el fondo de la zanja, plásticos viejos para las paredes de la misma, lana de acero para la válvula de seguridad, y alambre de amarre y estacas para fijar las tuberías de entrada y salida.

Las herramientas necesarias para la construcción de un biodigestor son típicas de conducciones de agua, como una tarraja para hacer rosca en la tubería que conducirá el biogás, o llaves 'stilson' (o "pico de loro") para apretar los accesorios de conducción. Estas herramientas son fáciles de encontrar. La selladora manual de plástico se usará para hacer el reservorio de biogás, y conviene comprarla si es que se van a construir varios biodigestores.

| Material | Precio USD |
|---|---|
| **Tarraja ½ “** | 5.19 |
| **Serrucho** | 6.67 |
| **Tijera** | 6.09 |
| **Llave “stilson”** | 19.48 |
| **Selladora manual plástico (30 cm)** | 26.67 |
| **Manguera transparente para nivel (12 m)** | 3.12 |

*Tabla 5.6.3-2. Herramientas necesarias para la instalación*

### 5.6.4 Cronograma de puesta en marcha

Para la construcción e instalación de un biodigestor sólo se necesita una mañana, si es que la zanja ya está cavada, lista, y se dispone de los materiales. La conducción de biogás hasta la cocina lleva también unas pocas horas, de acuerdo a la dificultad y distancias de cada caso. Pero ya que el biodigestor demorará en empezar a producir biogás unas semanas desde su carga inicial el día de su instalación, se puede hacer este trabajo con tranquilidad durante este tiempo de espera.

Lugar biodigestor

El biodigestor debe estar en un punto intermedio entre la cocina y el lugar donde duerman los ganados. Esto es para que la recogida de estiércol fresco cada mañana sea lo más fácil posible, a la vez que se ahorra en conducción de biogás al ser menor el recorrido. Es importante considerar que la zanja del biodigestor no debe interrumpir el camino de animales o personas. En valle, la zanja 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 trópico, el ambiente caluroso ya es suficiente para hacer funcionar correctamente el biodigestor, y por tanto su ubicación no tiene por qué estar orientada, y debe de primar la facilidad de la construcción. En este caso es obligatoria la protección del biodigestor con una techumbre. El biodigestor no debe tener ramas de árboles sobre él, ya que con el viento estas pueden caer y dañarlo.

Dimensiones y acabado de la zanja

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.

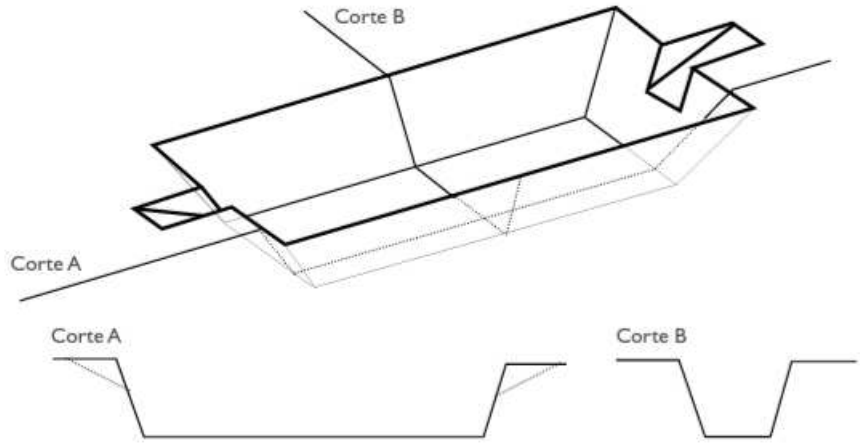


*Figura 5.6.4-1. Dimensiones de la zanja*

Forma de la zanja, con sus dos cortes. En ellos se ve que la zanja tiene las paredes inclinadas. También se puede ver los huecos para la entrada y la salida. De no poder cavar el terreno, habrá que levantar tapiales tratando de mantener las formas. Conviene que las cuatro paredes de la zanja tengan forma de "V", evitando de esta manera que se desmoronen las paredes. Además, se aproxima más a la forma tubular del biodigestor. Para la entrada y salida, se deberá cavar un canal inclinado, con un ángulo de 45º 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 con plásticos viejos. Finalmente, todas las paredes estarán recubiertas de forma que cuando se instalé el biodigestor, éste no sufrirá daño al rozarse con las paredes cuando se esté acomodando. El fondo de la zanja, aun al descubierto se ha de forrar o rellenar, con arena fina de río, con paja o igualmente con telas de sacos viejos o plásticos. 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 de las paredes, forrándolas, y cubriendo el suelo, el biodigestor estará listo para ser instalado.

Construcción biodigestor

- Doble capa de plástico

Lo primero es cortar dos piezas del plástico 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 ese metro se usara en amarrar 50 cm a la tubería de entrada y 50 cm para la salida.

Una manga de plástico se extiende completamente en el suelo, y la otra se recoge con cuidado en uno de sus extremos. Una persona agarra el extremo de esta manga de plástico recogida, y sin soltarla, cruza por el interior del biodigestor, de manera que quedará una sola manga de plástico de doble capa. Hay que evitar las arrugas interiores y tratar de hacer coincidir a las dos capas.

- Salida de biogás

Cuando recién se tenga la manga de plástico con doble capa hay que hacer la salida para el biogás usando un pasamuros (flange). Pero si no, hay que conseguir un macho y hembra de rosca de ½" pulgada. Además se deberá conseguir dos discos rígidos de plástico (limando sus bordes) a los que se les hace un agujero central del tamaño del macho. Conviene que el tamaño de estos discos rígidos no sea inferior a 10 cm de diámetro. Otros dos discos, ahora de plástico blando (con la cámara de los neumáticos) de diámetro superior a los discos rígidos, y a los que también se les hace un agujero central del mismo tamaño. De esta manera se hará un sándwich sobre el agujero que se fabrique sobre la doble capa de plástico de la siguiente manera: macho - disco rígido - disco blando - doble capa de plástico - disco blando - disco rígido – hembra.

Teniendo el pasamuros, hay que hacer un corte pequeño sobre las dos capas de plástico. Conviene hacer este corte sobre la mitad del biodigestor, pero más cerca de la entrada. Por ejemplo, para un biodigestor de 8 metros se tendrá una manga de doble capa de 9 metros. Desde la entrada, los primeros 50 cm serán para el amarre y a partir de este punto, a tres metros se hará la salida de biogás y por tanto el corte será 3.50 m del extremo de la entrada. Esto es por si hubiera algún tiempo de pendiente en la zanja, de forma que la campana de biogás se generará más cerca de la entrada, y de esta manera el biogás podrá salir. Se realizará el corte sobre los dos plásticos bien solapados, formando una pequeña "tienda de campaña" (carpa, triángulo) con un dedo y cortando la punta. Es mejor un corte pequeño, pues si no se puede introducir la flange, se abrirá el corte cuidadosamente, poco a poco, hasta que la flange pueda atravesarlo. Una vez hecho esto, se coloca el disco blando y se aprieta con la "hembra" usando primero la fuerza manual y luego ajustando con una llave "stilson". De manera que la doble capa quedará aprisionada entre dos discos de goma blanda apretados por la rosca entre el macho y la hembra. Para finalizar la salida de biogás, se corta una pieza de tubería de PVC de ½" de un metro o metro y medio, se tarraja (se hace rosca) los dos extremos y con teflón en la unión (al menos cinco vueltas en contra del sentido de la rosca) se enrosca a la salida de biogás (al pasamuros o flange). En el otro extremo de la tubería de ½" se coloca una llave de bola y la cerramos

- 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 casos son idénticos. Lo primero es proteger la boca 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. Para ellos basta con tomar la liga de neumático y amarrarla sobre la boca de la tubería cubriendo por unos milímetros el filo de ésta. La liga se amordaza sobre sí misma.

- Amarre de la entrada y salida

Teniendo los tubos de PVC de 6" y 1 m de largo ya protegidos, se colocan en los extremos del biodigestor, introduciéndolos dentro de la manga de doble capa unos 80 cm, y por tanto dejando a la vista 20 cm. Ahora hay que acomodar el plástico para poderlo amarrar a los tubos. Para ellos se coge 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. 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 auto. Esto significa que dentro del biodigestor quedarán 30 cm de 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.

- Introducción en la zanja

El biodigestor ya construido hay que meterlo en la zanja preparada, con sus paredes forradas y el suelo relleno. Para ello lo mejor es desplegar el biodigestor, y entre varias personas transportarlo hasta la zanja formando un "tren". 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. De este modo se inserta en la zanja. 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 metiendo alguien dentro de la zanja. De existir arrugas, éstas luego no podrán ser quitadas, que el peso de los metros cúbicos de lodo en el interior del biodigestor lo impedirán.

- 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.

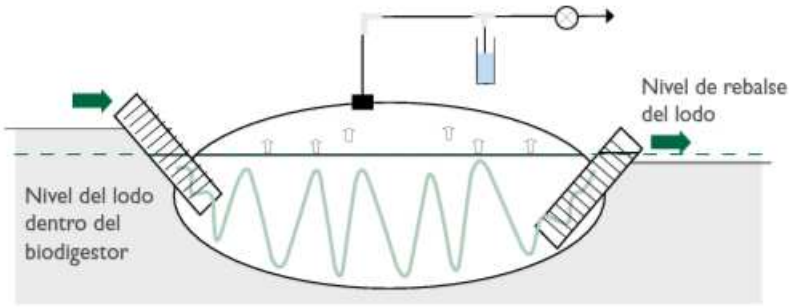


*Figura 5.6.4-2. Niveles dentro y fuera del biodigestor*

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. 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 de los 50 cm de 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. Para ello se hace un agujero pequeño en los tubos con la punta de un cuchillo o tijera, y se clava una estaca a medio metro. Pasando el alambre de amarre por el agujero del tubo se sujeta a la estaca. Una vez hecho esto, es muy recomendable cubrir los 50 cm de amarre de los tubos de entrada y salida con un saco viejo para que el sol no termine quemando las ligas neumáticas

<u>Primera carga de llenado</u>

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 que se produzca metano. La primera carga es importante pues de ella depende que se comience antes o después a producir biogás. De forma general conviene acumular estiércol fresco durante los siete días anteriores a la instalación, para que el día de la primera carga se tendrá suficiente material. En esta primera carga no es necesario andar mirando la mezcla de estiércol y agua y basta con echar al menos unas 7 carretillas de estiércol fresco y mezclarlo con agua suficiente para que entre suelto al biodigestor y seguir echando agua hasta que las bocas interiores de los tubos queden cubiertas. Hecho esto, toca cada día alimentar al biodigestor con las carga de mezcla diaria estimada. Para los biodigestores modelo propuestos es de 20 kg de estiércol con 60 litros de agua (1:3).

Conducción de biogás

Una vez instalado el biodigestor, es momento de continuar la conducción de biogás desde el biodigestor hacia la cocina. El biodigestor instalado tiene la salida de biogás preparada, con un pasamuros, una tubería de ½" de diámetro y un metro de longitud acabada en una llave de bola. A partir de este punto, se continúa con tubería de ½" de PCV ("politubo" o tubería de riego) hasta la cocina. Esta debe ser de forma aérea, la tubería elevada sobre postes, o apoyada a cierta altura sobre una pared. Esto es para tener acceso a ella. Las longitudes máximas son 100 metros, ya que para mayores convendría usar tubería de mayor diámetro. Lo óptimo es tener el biodigestor entre 20 y 50 m de distancia a la cocina. La conducción se hace directa, empleando codos y acoples cuando sea preciso.

Es muy importante colocar a la salida del biodigestor la válvula de seguridad, y el reservorio cerca de la cocina. Ambos elementos serán unidos a la conducción de biogás.

- Acumulación de agua

Es importante llevar la tubería elevada, nunca enterrada, por la acumulación de agua que se puede producir. El biodigestor va estar lleno de agua mezclado con estiércol. Ese agua se evaporará y se condensará en las tuberías. Esto puede llegar a taponarlas y no permitir que el gas llegue a la cocina. A veces es inevitable que la conducción de gas tenga "valles", puntos bajos donde se acumulará el agua. En estos puntos bajos se puede poner una T con la tercera salida tapada por un tapón de rosca, de manera que de vez en cuando, abriendo ese tapón, salga el agua acumulada. También se puede hacer toda la conducción siempre con inclinación, de forma que en caso de condensarse el agua, caiga hacia la válvula de seguridad, o a otro punto del que podamos drenar o purgar dicha agua.

- Válvulas de seguridad

La válvula de seguridad se coloca cerca del biodigestor, para que en la carga diaria podamos revisarla. Esta válvula va a permitir que en caso de que no se consuma biogás, éste tenga un lugar por donde escapar y a la vez evitar que entre aire de fuera (que mataría el proceso interno del biodigestor que produce biogás).

La válvula de seguridad puede realizar caseramente con una botella de plástico. Se hace un agujero en su parte superior para poder ir rellenándola de agua cuando ésta se vaya evaporando.

*Figura 5.6.4-3. Válvula de seguridad casera*

La válvula de seguridad se coloca al principio de la conducción de biogás, cerca del biodigestor, para poder ver todos los días si necesita más agua

A la salida de la conducción de biogás, tras la primera llave de bola, que había servido para cerrar la salida de biogás, se coloca una T, de manera que el biogás pueda seguir fluyendo hacia la cocina, pero a la tercera salida de la T se le une una pieza de tubería y ésta se introduce en la botella de refresco llena de agua. La tubería debe quedar sumergida en el agua de 8 a 13cm, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar del lugar, la distancia a la cocina, y el tipo de cocina. Cuanta mayor altura, menor presión se necesita y menos

tiene que estar sumergido el tubo en el agua. Cuanta mayor distancia a la cocina mayor presión se necesita y más sumergido ha de estar el tubo. Si es una cocina tradicional para gas (ya manipulada para funcionar con biogás) también conviene aumentar la presión. Para determinar la presión idónea es necesario ir realizando pruebas de la combustión de biogás en la cocina hasta que el usuario esté conforme. Tras la válvula de seguridad conviene colocar una llave de paso, de forma que se pueda aislar el conjunto formado por el biodigestor y la válvula de seguridad del resto de la conducción para posibles reparaciones o modificaciones. La válvula de seguridad, es el primer elemento que se ha de encontrar en la salida de biogás la conducción. En caso de que se coloque como primer elemento una llave de bola y después de esta la válvula, se corre el riesgo de que la llave quede cerrada por descuido o mala intención, y entonces el biogás producido en el biodigestor no tendrá forma de salir y terminará reventándolo. Hay que darse cuenta que la presión máxima del biogás va a estar dada por la profundidad a la que esté sumergida la tubería dentro del agua. Dentro de la tubería que llega a la botella de refresco llena de agua, se introduce lana de acero (estropajo de acero, “bombril”). Esta operación tiene dos funciones: por un lado, va a retener parte del ácido sulfhídrico que está en el biogás, quitando olores, y por otro lado, va a impedir que una combustión externa pueda propagarse por la tubería, evitando así peligro de explosiones. Conviene cambiar esta lana de acero o hierro cada seis meses, por eso está colocada en la válvula de seguridad accesible para su recambio.

- Reservorio de biogás

El reservorio va a ser el tanque de almacenaje de biogás y va a servir para aumentar la presión en caso de que ésta descienda. El reservorio tiene que estar colocado cerca de la habitación para la cocina, cuidando que no esté cerca del fuego. Normalmente se le cuelga del techo. Siempre debe estar protegido del sol bajo techo, en un almacén, o en el exterior pero protegido de los vientos.

El reservorio se hace con el mismo plástico con que se ha construido el biodigestor, empleando una única capa. Se corta un pedazo de tres metros de manga, y al igual que al biodigestor, hay que ponerle un pasamuros (flange) en su zona central. Se emplea la misma técnica que en el biodigestor. Una vez colocado el pasamuros se sellarán los laterales de la manga para cerrarla. De esta manera, la única manera de entrada o salida del biogás será por el pasamuros. Para sellar los laterales, se usa una selladora manual de plástico. Estas son fáciles de encontrar en los mercados y su costo no es muy alto. Merece la pena comprar una si se piensa hacer varios biodigestores. En caso de un único biodigestor conviene prestarse. Estas selladoras son de 30 y 40 cm de brazo, y para sellar

todo el borde de la manga de plástico, habrá que hacer “zig-zag” sobre el borde, sellando por tramos, teniendo cuidado de que los laterales del plástico queden bien sellados, pues justamente en esos pliegues puede haber descuidos. En caso de duda, hacer doble sellado repitiendo la operación. Es necesario hacer pruebas previamente para regular la potencia de estos selladores, asegurando así que el plástico quede bien sellado. Habiendo sellado ambos laterales, se hacen pliegues en forma de acordeón en los extremos del reservorio y se amarran con liga de auto. Esto es para que la presión de biogás no abra los tramos sellados. Además de que se puede poner alguna pieza hueca en los extremos y amarrar el plástico sobre ella, para más tarde poder pasar una soga y colgar el reservorio del techo. Normalmente se pueden usar como pieza hueca un trozo de tubo viejo, amarrando el plástico a su entorno, y así poder pasar una soga por el interior del tubo y colgar el biodigestor. Construido el reservorio, habrá que conectarlo a la conducción de biogás. Para ello se pone una “T” en la conducción donde por una entrada va a venir el biogás del biodigestor, por otra ir hacia la cocina, y por otra va a conectarse al reservorio. Es normal poner una llave de bola a un metro de conducción de reservorio, para poder cerrarla y aislarlo en caso de que se pinche o haya fuga. Una vez sellados los extremos del reservorio se tiene un tanque hermético cuya única salida es la flange central. Normalmente se recogen los extremos, plegándolos como acordeón y se amarran entorno algún elemento hueco, por ejemplo un pedazo de tubería para poder pasar una pita por ella y colgar el biodigestor. Téngase en cuenta que el plástico estará cerrado y sellado y se amarra entorno a la tubería solo para poder colgar el biodigestor, por ello no es necesario que sea un pedazo de tubo, puede ser cualquier otro elemento que usemos para amarrar los extremos y luego poder colgar el biodigestor. El reservorio, como se ha dicho, no solo almacena mayor cantidad de biogás, sino que además permite aumentar la presión. Si se ha estado consumiendo mucho biogás y la llama pierde fuerza en la cocina, se puede amarrar una pita (normalmente liga de neumático) alrededor del reservorio colgado. Jalando de esta liga, se apretará el reservorio, comprimiendo el biogás dentro y aumentará la presión, de manera que saldrá con más fuerza por la cocina. Esta es una de las razones por las que el reservorio tiene que ser accesible y cercano a la cocina.

Etapa de arranque

En el caso de un proceso de carga continua, realizada en un solo depósito de digestión, correspondería a una fermentación de una sola etapa. La producción del biogás, comienza después de cierto periodo, denominado TRH (Tiempo de retención Hidráulica) a partir de una carga inicial, en función del tipo de las materias primas y de la temperatura interna de funcionamiento del biodigestor.

Las diferentes etapas para una correcta operación del biodigestor se pueden agrupar en:

- Retiro del agua utilizada para la prueba de filtraciones. Una vez finalizada la prueba con agua para comprobar que no existen filtraciones en el biodigestor, se debe retirar parte del agua, dejando sólo 1/3 de la altura del digestor. Esta agua que se deja tiene por finalidad contribuir a diluir las materias orgánicas seleccionadas, con que se cargará el digestor en la fase de carga inicial
- Preparación de la carga inicial. Este proceso se caracteriza por el llenado completo del digestor. En un tambor limpio de cualquier producto químico o combustible se prepara una mezcla formada de residuos animales y/o humanos y residuos vegetales, tales como pajas, tallos, previamente trozados. Es necesario incorporar esta carga de materias orgánicas diluida con agua.
- Término de la primera carga. Hay que dejar abierta la conexión para la salida de gas, durante 5 a 7 días, con el objeto de eliminar todo el oxígeno que pueda existir como producto de las primeras fases del proceso de descomposición de las materias orgánicas. Posteriormente hay que cerrar y dejar que se eleve la presión interna y soltar el gas. Esta operación hasta completar 10 – 15 días, con lo cual se elimina todo el oxígeno remanente, junto con el anhídrido carbónico (CO) que se genera en las primeras fases del proceso de fermentación, previas a la etapa de formación de metano ($CH_4$)
- Pruebas de inicio de producción de biogás. Transcurridos 15 días de la carga inicial o de arranque, se debe comenzar a verificar el inicio de producción de biogás ($CO_2$ y $CH_4$), mediante la verificación de “quema de biogás”. Se acopla una manguera a la salida de gas y utilizando un quemador o mechero, se prueba si el gas se enciende. Si el gas quema con una llama azulada y de buena consistencia, se puede iniciar el uso normal del biogás. En caso contrario, si no enciende o quema mal, se debe eliminar todo el gas y repetir la prueba cada vez que se alcance una presión interna adecuada. Si después de 30 días (o 45 días, de acuerdo a la temperatura interna del digestor) de completada la carga de arranque, el gas que se genera no se quema, podría existir algún problema en la fermentación. En ese caso, habrá que verificar que no exista una acidificación excesiva de la carga (inferior a pH 6), variaciones bruscas de la temperatura interna del digestor o materiales contaminados con productos químicos que pudieran alterar la actividad microbiana.

Etapa de operación

Carga diaria normal. Con el tubo de entrada tapado de la caja de carga, se prepara una mezcla de residuos (animales) con agua formando un lodo. El volumen total de esta mezcla está en función del volumen total del digestor y del Tiempo de Retención Hidráulico.

Se coloca un plástico transparente encima de la caja de carga y deja reposar esta mezcla hasta el día siguiente; donde se espera la hora de mayor temperatura atmosférica. En ese momento, se retira el material fluctuante, se homogeniza la mezcla y se deja entrar al digestor. El volumen (afluente) que entra, conlleva a que salga por el tubo de la caja de descarga igual volumen (efluente): biofertilizante.

### 5.6.5 Mantenimiento del biodigestor

A continuación, se listan los aspectos principales a monitorear durante el funcionamiento de un biodigestor tubular de polietileno:

- No debe estar es que no esté a la intemperie, si no al reguardo de la sombra, para que su vida útil sea mayor y que se mantenga alejado de ramas, herramientas, elementos filosos o animales curiosos que quieran morder o pisar la lona de plástico. Esto último se puede evitar haciendo un cerco perimetral alrededor del biodigestor.
- Periódicamente se debe inspeccionar y verificar si existen filtraciones de agua o aire en el biodigestor, para proceder a su reparación.
- Por lo menos una vez al año, se debe vaciar completamente el digestor, retirando el lodo remanente del fondo.
- A la válvula de seguridad nunca debe faltarle agua, porque de evaporarse el biogás se escapará y después el biodigestor interrumpirá su proceso de biodigestión al entrarle aire. La válvula de seguridad tiene que tener siempre suficiente agua, como para que el tubo éste sumergido de 8 a 13 cm en el agua de la botella de plástico.
- Hay que vigilar la condensación de agua en las tuberías de conducción de biogás, ya que de acumularse agua la llama en la cocina sale con “golpeteos” y si no se remedia terminará por no llegar biogás a la cocina. Para ello hay que purgar frecuentemente las tuberías.

Instalado ya el biodigestor, se realiza una primera carga de siete carretillas 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 (unos 6 a 10 años). Cada mañana se deberá recoger 20 kg de estiércol fresco y mezclarlos con 60 litros de agua para introducirlos al biodigestor. Esto asegura una producción de biogás de unos 700 a 750 litros al día, suficiente para 4-5 horas de cocina. En el caso de haber diseñado un biodigestor de otras características, habrá que echar la carga de mezcla diaria correspondiente. Para la carga diaria se puede hacer una "caja de mezcla" a la entrada del biodigestor, de manera que echando el estiércol sobre esa caja (normalmente de barro, o de adobe forrada de plástico) se vaya mezclando con el agua y caiga la mezcla diluida al interior del biodigestor. Igualmente a la salida, conviene hacer una poza, de un metro de profundidad y de un metro de lado, donde se vaya acumulando el fertilizante. 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.

## 5.7 Biodigestor tipo laguna cubierta con geomembrana y cubierta de PVC

Se los utiliza principalmente para tratar residuos de explotaciones agropecuarias y de la agroindustria; dado que estos establecimientos generan importantes cantidades diarias de residuos; como por ejemplo grandes tambos, criaderos de cerdos, establecimientos con gallinas ponedoras en jaulas, residuos sólidos desde plantas de tratamiento de efluentes. También para Municipios y Comunas con el fin de procesar los residuos orgánicos domiciliarios.

### 5.7.1 Descripción componentes del biodigestor

Este tipo de biodigestor resulta de utilidad cuando se requiere trabajar con volúmenes importantes y en la medida que la profundidad de las excavaciones necesarias comience a resultar problemática, al aparecer demasiada humedad a causa del nivel de las napas freáticas.

Se trata de un biodigestor de gran volumen, en el cual se realiza la digestión anaeróbica de todos los residuos orgánicos de un establecimiento rural, convirtiéndolos en energía renovable, y en abono orgánico. La cantidad de biogás que produce a diario puede reemplazar por co-generación el diesel de grupos electrógenos o accionar motores de maquinarias, cargar baterías y ordeñadoras, en el caso de un tambo.

El biodigestor tiene una geometría "alargada" donde la mezcla de materia orgánica y agua circula en "flujo pistón". Este tipo de flujo permite que cada porción del residuo que ingresa por un extremo cumpla el tiempo de residencia necesario dentro del biodigestor antes de salir por el otro extremo, bien alejado del inicio.

A continuación se realiza una descripción general de los componentes por implementar en el marco de la instalación y puesta en marcha de la tecnología de biodigestores en el feedlot.

Pozo de mezcla:

El pozo de mezcla es el depósito donde se hará la mezcla de estiércol con agua para una adecuada disolución del estiércol antes de ingresarlo a los biodigestores. Se construirá con una capacidad de $1m^3$ al final de la rampa y será de forma redonda, con las siguientes dimensiones: diámetro interno 1,4 m y altura 0,70 m. Este pozo tendrá paredes de 10 cm de espesor; en la parte inferior contraria a la rampa se encontrarán 2 tuberías de 6" de diámetro que estarán conectadas a cada biodigestor. Las uniones entre el pozo y las tuberías de salida de cada biodigestor tendrán una válvula de compuerta de 6", para mantenerla cerrada, a su vez cada tubería contara con una rejilla de 6" de abertura para evitar la entrada de cualquier objeto extraño que pueda interferir con el paso de la mezcla. Además este pozo de mezcla contara con un techo para su protección de las lluvias, el cual será construido de chapa.

Biodigestores:

Los biodigestores servirán como sistemas de almacenamiento de gas para abastecer al generador eléctrico y estarán fabricados de geomembrana de PVC reforzada de 1mm de espesor como mínimo.

Se colocará un biodigestor en cada zanja. Cada biodigestor tendrá un volumen de 75 $m^3$, dando un volumen total de 150 $m^3$ y estarán separados 2 metros entre cada biodigestor. El área de cada biodigestor será de 70 $m^2$.

Cada biodigestor estará conectado al pozo de mezcla o caja de distribución por medio de 2 tuberías de 6" de diámetro de PVC. La entrada en ambos biodigestores estará por debajo del nivel del líquido dentro del biodigestor, de esta forma se evitará la entrada de aire al interior del sistema. La tubería tendrá una inclinación de acuerdo a las especificaciones del proveedor, siendo el punto más alto la salida de la caja de distribución, para facilitar la entrada de la mezcla a los biodigestores. La distancia entre la caja de distribución y los biodigestores será de 3 metros.

En la salida de los biodigestores, se conectará una tubería de 6" por cada biodigestor, que irá conectada a una laguna secundaría, que es donde se almacenará el biol, al igual que con las tuberías de la caja de distribución las tuberías de salida de biol deberán tener una inclinación de acuerdo a las especificaciones del proveedor. Cada biodigestor tendrá una tubería de salida para el gas, la cual será de PET y estará conectada a un kit de gas el cual contará con una válvula de seguridad, la cual dejara salir el gas en caso de sobre presión de este en los biodigestores para evitar daños en el sistema.

También se instalará un filtro para eliminar el ácido sulfhídrico ($H_2S$) producto de la digestión anaeróbica, el cual, de no ser eliminado, causará problemas de corrosión en el motor del generador eléctrico. Así mismo se contará con un sistema de remoción de condensados para eliminar el agua en los puntos donde la línea de conducción tenga ondulaciones. Todo este sistema estará instalado en el lugar que el proveedor del equipo lo crea conveniente.

La línea de conducción de biogás contará con un sistema de dos válvulas para conectar el ingreso del biogás desde cada biodigestor hacia la línea principal de transporte de biogás. Antes del ingreso a los generadores se tendrán dos válvulas para poder direccionar el flujo de biogás, esto permitirá poder hacer funcionar un generador a la vez o los dos al mismo tiempo de acuerdo al requerimiento energético

Laguna de biofertilizante:

Será la laguna en donde se almacenará el biol y el biosol para su posterior uso en el campo para la fertilización de sus tierras y eventualmente para su distribución para la venta.

El biol será removido de la laguna por medio de bombas centrífugas para depositarlo en los envases para su adecuada distribución y fertilización en el campo.

*Figura 5.7.1-1. Biodigestor tipo laguna cubierta con geomembrana y cubierta de PVC*

### 5.7.2 Cronograma de puesta en marcha

El tiempo de ejecución física del proyecto será de 24 meses calendario. La misma que incluye 4 meses para la preparación de la obra y 1 año para monitoreo, asistencia técnica continua y ajustes del sistema en caso de ser necesario. La ejecución debe hacerse manteniendo cierto orden secuencial partiendo desde las mejoras del corral, instalación de los biodigestores, pozos de mezcla, laguna de biol, galpón de máquinas, instalación de redes secundarias y conexiones domiciliarias. Este orden es con el fin de ir verificando en el campo las cotas, ubicaciones de los componentes específicos de infraestructuras, etc. Lo anterior descrito no descarta la ejecución en forma paralela de algunos componentes de la infraestructura, previa verificación de cotas, emplazamientos, etc.

Trabajos preliminares: son todas las labores previas y necesarias para iniciar la obra propiamente dicha.

- Limpieza: se ejecutará la eliminación de basuras, elementos sueltos, livianos y pesados en toda el área donde se va a desarrollar los trabajos; así mismo se realizará la extracción de raíces, malezas y todo tipo de vegetación que impida la fácil operación y construcción de las obras que pueda causar problemas en el futuro. Vale aclarar que el proyecto no generará deforestación, ya que la zona

elegida para la realización del proyecto no contiene árboles ni arbustos, es un sector más bien limpio de vegetación.

- Nivelación del terreno: comprende la ejecución de los trabajos de corte, relleno, afirmado, acarreo de material necesario para la nivelación y eliminación de material excedente y todo movimiento de tierras necesario para adecuar el terreno a los niveles establecidos en las diferentes obras del proyecto.
- Corte de terreno: constituye el movimiento de tierras mediante una retroexcavadora para obtener en primer lugar la zanja para el biodigestor, la laguna de biol y los canales para las tuberías, de acuerdo a las dimensiones señaladas en los planos respectivos.

### 5.7.3 Mantenimiento del biodigestor

Periódicamente se debe controlar si existen filtraciones de agua o aire en el biodigestor, para proceder a su reparación. Además, tal como se recomienda para el biodigestor tubular de polietileno, el biodigestor de laguna cubierta se debe vaciar completamente retirando el lodo remanente del fondo, al menos una vez por año.

Este vaciamiento permite realizar las siguientes acciones:

1. Tratamiento de roturas: se cincelan las roturas en forma de V, se raspa la superficie circundante y posteriormente se llena ese agujero en forma de V con cemento para luego compactarse.
2. Cuando no se encuentran filtraciones, se debe lavar la cámara de fermentación y aplicar dos o tres capas de enlucido con una pasta pura de cemento.
3. Si el enlucido está deteriorado o deformado, es necesario sacarlo y lavar las paredes; luego hay que volver a enlucir aplicando, una tras otra, distintas capas de enlucido muy fino con una cuidadosa compactación.
4. Cuando el agua freática penetra al biodigestor, es preciso aplicar una pasta salada con agua; así se tapa el hoyo y se aprieta aplicando cemento con una cubierta de cenizas durante 20 minutos y entonces se remueve la cubierta. El cemento del enlucido con material salado se vuelve a aplicar, se vuelve a apretar con la envoltura y se repite este proceso tres veces.
5. Cuando se produce una combinación de filtraciones en caños (tubos de entrada y salida) y cúpula, se cincela alrededor de la filtración y se saca el caño; entonces se vuelve a colocar cemento u hormigón de gravilla, haciendo fraguar localmente para que se fije el caño

Otras medidas de mantenimiento preventivo que deben practicarse sistemáticamente son las siguientes:

1. Se debe revisar frecuentemente las junturas de la manguera para asegurar que no se filtre ni el agua ni el aire.
2. Después del trabajo diario, se debe lavar el depósito donde se preparan las mezclas de materia primas con agua limpia.
3. Si el depósito de descarga permanece sin uso por un período largo, se debe exponer al ambiente para evitar su corrosión interna.

# 6 FACTORES A CONSIDERAR PARA EL AHORRO

La utilización de la tecnología de biodigestores no sólo disminuye el impacto ambiental que genera un feedlot, sino que también, a partir del aprovechamiento de sus productos (biogás y biofertilizantes), puede significar un aumento considerable en la rentabilidad del negocio. A continuación se mencionan los factores que pueden contribuir a la misma.

## 6.1 Biogás

Luego de realizar un minucioso análisis de las diversas formas de aprovechamiento del biogás generado en el proceso de biodigestión para obtener un ahorro económico en la actividad feedlotera, se llegó a la conclusión de que es muy difícil cuantificar los ahorros de forma general cuando se tiene un número de cabezas (nivel de actividad) variable. Esta conclusión surge principalmente de la gran cantidad de aplicaciones que se le puede dar al biogás. Por un lado, se puede utilizar el biogás para generar tanto energía eléctrica como energía térmica. A su vez, a la energía generada se le puede dar un sinfín de aplicaciones. La energía eléctrica se puede utilizar, por ejemplo, para reducir gastos en energía eléctrica del establecimiento (depende de las instalaciones y de los equipos utilizados), abastecer las necesidades de una casa, un pueblo o contribuir a la línea eléctrica de una central (se requiere un nivel de actividad considerable para ello), etc. En cuanto a la energía térmica, esta puede utilizarse para calefaccionar un hogar, para cocinar, para mejorar la temperatura de la mezcla que ingresa al biodigestor y así optimizar el proceso de biodigestión (en caso de ser necesario), para generar vapor para otros procesos, etc. Además, el biogás puede utilizarse como combustible para alimentar motores o como medio para la iluminación.

Como se puede ver, las aplicaciones del biogás son muy amplias, y dependen mucho de las condiciones y posibilidades de cada productor. Es por ello que se presentarán algunas formas de aprovechamiento del mismo, pero se dejará abierta la elección de cómo aplicarlo según el caso y las posibilidades del interesado en la tecnología de biodigestores. También se excluirán del análisis los beneficios económicos que se pueden obtener a partir del mismo, ya que, como se dijo, estos varían mucho con cada aplicación. A continuación se presentan, a modo descriptivo, algunas formas de aprovechar el biogás generado.

Lo primero que se debe hacer para ver de qué manera se puede aprovechar el biogás generado en la biodigestión anaeróbica con los efluentes de un feedlot es calcular cuánto biogás puede ser producido en condiciones normales utilizando como sustrato estiércol

de bovinos. Esta estimación se puede realizar teniendo en cuenta una temperatura promedio del lugar donde se instalará el biodigestor de 20 °C y un tiempo de retención hidráulico de entre 25 y 30 días. Teniendo en cuenta estas condiciones, se puede estimar que se producen 0,35 $m^3$ de biogás por kilogramo de excreta sólida de bovino (el porcentaje de excreta sólida del estiércol es del 15%), a partir del gráfico de la "Figura 4". En la sección donde se describe la anatomía de los bovinos se encuentra el dato de cuánto estiércol excreta un bovino según su peso, siendo este valor del 6% (0,06 kg de excreta húmeda por kg de peso vivo del animal).

### 6.1.1 Generación de energía eléctrica:

La electricidad que se puede generar a través del biogás se obtiene mediante la utilización de motores de combustión interna. Estos motores funcionan con el biogás generado por la digestión anaeróbica y se alimentan directamente del biodigestor o de un gasómetro externo al mismo.

El biogás requiere de un sistema de acondicionamiento para purificar el contenido de ácido sulfhídrico y de vapor de agua. Esto requiere de instalaciones específicas en la línea de distribución así como de la implementación de inyección regulada de oxígeno en el gasómetro para reducir la concentración de ácido sulfhídrico (ya que de lo contrario el mismo puede corroer tanto el motor como las tuberías que se utilizan para el transporte del mismo).

Un valor clave en los cálculos de consumo de biogás para la generación de energía eléctrica es la concentración de metano en el mismo. Mientras que el gas natural tiene aproximadamente un 97% de metano, las proporciones de este compuesto en la mezcla son variables entre un 40 y un 60%, pudiendo tomar como valor de referencia 50% de concentración de metano en el biogás. Con un metro cúbico de gas natural con 97% de metano se pueden generar, con la utilización de una turbina de gas (como en las plantas de ciclo combinado), aproximadamente 10 KWh de energía eléctrica.

Un parámetro clave para estimar la energía eléctrica que se puede generar a partir del biogás es la eficiencia de transformación del metano en electricidad. La misma está conformada por la eficiencia de transformación de energía térmica (poder calorífico) en energía mecánica (eficiencia de transmisión) y esta a su vez en energía eléctrica con la utilización de un generador eléctrico (eficiencia del generador eléctrico). Las eficiencias son menores en los motores generadores de tamaños pequeños. Para el caso de motores de 1 MW de capacidad, la eficiencia aproximada conjunta es del 43% en la transformación

de energía térmica en electricidad. Esto significa que planteado como único aprovechamiento el eléctrico se desperdicia una gran cantidad de energía térmica que se libera a través del escape en forma de aire caliente (aproximadamente 18%) y en los sistemas de refrigeración 39%. Estos valores dependen de distintos equipos y proveedores de motores y pueden cambiar hasta 5% dentro del mismo proveedor.

Por lo tanto si alimentamos un motor generador con biogás que contenga un 50% de metano y partiendo de una eficiencia del 43% en la transformación de energía térmica en electricidad, obtendríamos un factor de conversión de 2,15 KWh de electricidad por m3 de biogás (50% * 43% * 10 KWh/m3). El calor que se libera a través del escape puede utilizarse para calefaccionar la mezcla de sustrato y agua antes de que ingrese al biodigestor de manera de aumentar la temperatura y con ello la eficiencia de la fermentación anaeróbica.

### 6.1.2 Generación de energía térmica:

El poder combustible del biogás se determina a partir de su concentración de metano. El biogás tiene un poder calorífico de 5200 kcal/$m^3$. Sabiendo que una kcal equivale a 0,00116 KWh, obtendremos 6,032 KWh de energía calorífica por metro cúbico de biogás. Dado que el poder calorífico del biogás es menor al del gas natural, al del butano o al del propano, si se quiere utilizar para cocinar se necesitará más tiempo para cocer los alimentos. El consumo de una cocina doméstica normal se puede estimar en 130 – 170 litros por hora. También se puede utilizar para alimentar quemadores infrarrojos que mantengan la temperatura de un lugar cerrado (por ejemplo un criadero de pollos). Para calcular el ahorro que se puede obtener generando energía térmica con el biogás, se puede comparar el mismo con otros combustibles que se utilizan en establecimientos de engorde a corral normalmente, teniendo en cuenta sus respectivos costos:

| **1 m3 de biogás equivale a:** | |
|---|---|
| **Madera (kg)** | 1,30 |
| **Alcohol (litros)** | 1,10 |
| **Gasolina (litros)** | 0,75 |
| **Gas-oil (litros)** | 0,65 |
| **Gas natural (m3)** | 0,57 |
| **Carbón (kg)** | 0,70 |

*Tabla 6.1.2-1. Equivalencias del biogás como combustible*

Una forma de generar conjunta y eficientemente energía eléctrica y energía térmica es mediante la cogeneración de energía. Consiste en la producción simultánea de ambos tipos de energía utilizando un único combustible, como puede ser el gas natural o el biogás. Para más detalles ver la sección de "Productos del proceso de biodigestión", en la parte de aplicaciones del biogás. Se puede afirmar que esta es la forma más racional de utilizar el biogás, ya que permite generar ahorros optimizando al máximo los recursos (alta eficiencia de la generación de energía).

## 6.2 Biofertilizante

Los ahorros que se pueden obtener a partir del biofertilizante están directamente relacionados con el reemplazo de los mismos por los fertilizantes químicos que se utilizan para la producción de granos, que pueden ser destinados a alimentación de bovinos en feedlot o vendidos al mercado propio (local o de exportación). Estos representan la mayor parte de los gastos operativos para la producción de granos, y aportan los nutrientes que el suelo necesita para que luego el cultivo se desarrolle de la mejor manera y así obtener altos rendimientos de cosecha.

### 6.2.1 Composición del biofertilizante

Lo primero que se debe hacer para cuantificar el ahorro que se puede generar con el biofertilizante que se obtiene del proceso de biodigestión es analizar la composición de ambas partes del biofertilizante (tanto del biol como del biosol), para ver qué nutrientes puede aportar cada una. Su composición fue presentada en la sección de "Productos de la biodigestión", pero se refrescan a continuación:

| Composición físico-química Biol | |
|---|---|
| pH | 7,8 |
| Materia Seca | 4,18% |
| Nitrógeno total | 2,63 g/kg |
| NH4 | 1,27 g/kg |
| Fósforo | 0,43 g/kg |
| Potasio | 2,66 g/kg |
| Calcio | 1,05 g/kg |
| Magnesio | 0,38 g/kg |
| Sodio | 0,404 g/kg |
| Ácido indol acético | 9,0 ng/g |
| Giberelina | 8,4 ng/g |
| Purinas | 9,3 ng/g |

| Composición físico-química Biosol | |
|---|---|
| pH | 7,6 |
| Materia Seca | 85 % |
| Nitrógeno total | 2,7 % |
| Fósforo P2O5 | 1,6 % |
| Potasio K2O | 2,8 % |
| Calcio CaO | 3,5 % |
| Magnesio MgO | 2,3 % |
| Sodio Na | 0,3 % |

*Tabla 6.2.1-1. Composiciones del biol y del biosol*

A simple vista se observa que el biosol tiene mucha mayor concentración de nutrientes que el biol, pero a su vez la cantidad producida utilizando estiércol de vaca como sustrato es mucho menor: 3% de biosol contra un 97% de biol para la mayoría de los casos. Para ver más claro las concentraciones de los compuestos más importantes, se traducen las

mismas en porcentajes a continuación en las siguientes tablas, especificando tanto las del biol como las del biosol:

| Nutrientes Biol | % |
|---|---|
| **P** | 0,043% |
| **N** | 0,263% |
| **K** | 0,266% |
| **Ca** | 0,105% |

*Tabla 6.2.1-2. Nutrientes en el biol*

| Compuestos Biosol | % |
|---|---|
| **$P_2O_5$** | 1,60% |
| **N** | 2,70% |
| **$K_2O$** | 2,80% |
| **CaO** | 3,50% |

*Tabla 6.2.1-3. Compuestos en el biosol*

Se puede observar que los nutrientes fósforo, potasio y calcio del biosol vienen expresados en forma de compuesto en el caso del biosol. Para unificar unidades, se realizó la conversión a elementos, calculando la concentración de cada uno dentro de la molécula mediante los pesos atómicos:

| Compuesto | Composición | |
|---|---|---|
| $P_2O_5$ | %P | 43,67% |
| | %O | 56,33% |
| $K_2O$ | %K | 82,98% |
| | %O | 17,02% |
| CaO | %Ca | 71,43% |
| | %O | 28,57% |

*Tabla 6.2.1-4. Concentración de cada elemento por molécula*

Así se puede volver a expresar las concentraciones del biosol con los elementos, al igual que están expresadas en el biol, y ver las diferencias de concentración de nutrientes entre ambos:

| Nutrientes Biosol | % |
|---|---|
| **P** | 0,70% |
| **N** | 2,70% |
| **K** | 2,32% |
| **Ca** | 2,50% |

*Tabla 6.2.1-5. Nutrientes en el biosol*

También vale la pena destacar que el biol tiene una gran concentración de amonio ($NH_4^+$) en comparación con el resto de sus componentes. La presencia de esta sustancia mejora notablemente la absorción del fósforo.

### 6.2.2 Fertilizantes químicos

Los fertilizantes químicos más utilizados aportan principalmente los nutrientes nitrógeno (N) y fósforo (P), y en menor medida potasio (K), azufre (S) y calcio (Ca). Estos últimos tres nutrientes serán necesarios dependiendo de la zona donde se esté desarrollando el cultivo, ya que depende del suelo característico de la región, mientras que los primeros dos son importantes para cultivar en todas las regiones, dado que son nutrientes fundamentales que los cultivos necesitan para desarrollarse sin importar donde se

siembren. Por otro lado, existen los llamados micro nutrientes (manganeso, boro, magnesio). Estos no se considerarán en el cálculo del ahorro, ya que por más que el biofertilizante aporta magnesio (por ejemplo), estos micronutrientes se aportan en cantidades muy pequeñas y en casos específicos.

Los fertilizantes químicos más utilizados en el mercado se clasifican según el nutriente que aportan principalmente, pudiendo encontrar fertilizantes nitrogenados, fosfatados, azufrados (hay algunos ricos en calcio) o potásicos. Dentro de cada categoría, se buscó el fertilizante más representativo (el que mayor cantidad de nutriente esencial aporta) para obtener el costo de cada nutriente esencial que puede ser reemplazado por lo que aporte el biofertilizante.

- Nitrogenados: Urea Granulada (UG).

**Grado:** 46-0-0

**Color:** Blanco

**Granulometría:** 2 - 4mm

**Observaciones:** es el fertilizante sólido con mayor concentración de N

**Presentación:** a granel o en bolsa

*Figura 6.2.2-1. Urea Granulada*

- Fosfatados: Fosfato Monoamónico (MAP).

**Grado equivalente:** 11-52-0

**Grado:** 11-23-0

**Color:** Blanquecino a negro según origen y proceso industrial

**Forma física:** sólido granulado
**Presentación:** a granel o en bolsa

*Figura 6.2.2-2. Fosfato Monoamónico*

- Azufrados: Sulfato de Calcio o Yeso Agrícola (SCa).

*Figura 6.2.2-3. Sulfato de Calcio o Yeso Agrícola*

- Potásicos: Cloruro de Potasio (CP).

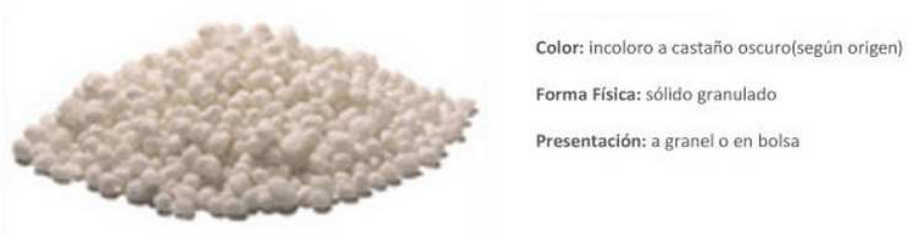


*Figura 6.2.2-4. Cloruro de Potasio*

A continuación se presentan los nutrientes que aporta cada fertilizante, expresado en porcentaje. La información se recolectó de un catálogo de fertilizantes proporcionado por la empresa Profertil, y se chequeó que sean valores representativos del mercado de los fertilizantes químicos.

| **Fertilizante** | **Composición (compuestos)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **N** | **$P_2O_5$** | **$K_2O$** | **Ca** |
| **MAP** | | 52,00% | | |
| **UG** | 46% | | | |
| **CP** | | | 62,00% | |
| **SCa** | | | | 23% |

*Tabla 6.2.2-1. Compuestos en los fertilizantes químicos*

Se puede observar que en el MAP y en el CP se siguen presentando los nutrientes en forma de compuestos, con lo cual se convirtieron a nutrientes en forma de elementos utilizando nuevamente los pesos atómicos, y agregando además el precio de cada fertilizante en dólares por tonelada:

| Fertilizante | Precio (U$S/tn) | Composición (nutrientes) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | N | P | K | Ca |
| **MAP** | $630,00 | | 22,71% | | |
| **UG** | $510,00 | 46% | | | |
| **CP** | $330,00 | | | 51,45% | |
| **SCa** | $420,00 | | | | 23% |

*Tabla 6.2.2-2. Nutrientes en fertilizantes químicos y precio de cada uno por tonelada*

### 6.2.3 Valorización de los nutrientes del biofertilizante

Se tuvo una charla con el Ingeniero Oscar Rafael Raffo, productor agrícola de referencia de la zona pampeana argentina (la de mayores rindes de cosecha del país). Él utiliza los fertilizantes presentados para su campo, y aclaró que los cálculos que se realizan normalmente para estimar las necesidades de los fertilizantes químicos se basan en las necesidades de los nutrientes principales que cada suelo necesita, con lo cual es razonable adoptar como ahorro que genera el biofertilizante el precio que se pagaría por el nutriente que se desea aportar al suelo mediante el fertilizante químico. Por ejemplo: como debería pagar 630 U$S si quisiese adquirir 0,2271 tn tonelada de P, tendré que pagar 630/0,2271 = 2774,4 U$S para adquirir 1 tn de P. En base a este razonamiento se calculó el precio de ahorro que genera cada nutriente, en dólares por tonelada:

| Nutriente | Precio (U$S/tn) |
|---|---|
| **P** | $2.774,30 |

| | |
|---|---|
| **N** | $1.108,70 |
| **K** | $641,43 |
| **Ca** | $1.826,09 |

*Tabla 6.2.3-1. Precio por tonelada de cada nutriente*

De esta manera, a partir del cálculo de las toneladas de biol y biosol que se producen por año con la excreta bovina se puede calcular cuánto ahorro genera la venta de biofertilizante a productores de grano utilizando la tabla de precios por nutriente y de concentraciones de nutrientes en cada compuesto del biofertilizante. A continuación se muestra el ahorro que se obtiene, en dólares, por tonelada de biol y de biosol luego de haber hecho el cálculo siguiendo el razonamiento descripto:

| **Ahorros (U$S/tn)** | |
|---|---|
| Biol | $7,19 |
| Biosol | $7,69 |
| **Biofertilizante** | **$14,88** |

*Tabla 6.2.3-2. Ahorro generado por tonelada de biofertilizante*

# 7 CASOS DE ESTUDIO

## 7.1 Introducción

El objetivo del estudio de factibilidad consiste en dimensionar la inversión que requiere la instalación de la tecnología de biodigestión en función de la cantidad de cabezas disponibles para la recolección de excretas y a su vez estimar los ingresos y/o ahorros en biofertilizante que esta nueva implementación generaría.

Generalmente cuando se consulta sobre la instalación de biodigestores, las empresas que los fabrican tienen el producto listo para la venta -con su precio final- y el interesado queda sujeto a la gama limitada de biodigestores (diferenciados por tamaño, es decir, capacidad de biodigestión) disponible en el mercado. Los únicos casos en los que el fabricante parecería poder ajustarse a las especificaciones del cliente sería en los biodigestores de escala industrial, pero estos no son objeto de estudio de este trabajo.

Es por eso que se quiere profundizar más en el desarrollo de biodigestores de pequeña y mediana escala de producción y poder tener una idea del rédito que se puede obtener al instalar un sistema de biodigestión dimensionado para un nivel de actividad de X cantidad de cabezas bovinas y, al ir modificando ese parámetro, observar cómo varían las principales variables económicas del proyecto:

- Inversión inicial del proyecto.
- Ingresos netos mensuales: ingresos generados a partir de la venta mensual de biofertilizantes a los que se le restan los costos mensuales de producción y comercialización.
- Período de repago descontado: se estima el flujo de fondos del proyecto con la inversión inicial y los ingresos netos mensuales futuros descontados a una determinada tasa de interés (TREMA) y se calcula el mes en el que la inversión será saldada con el flujo de fondos futuro descontado. Este indicador es uno de los ideales a la hora de tomar una decisión por la afirmativa o por la negativa para ser partícipe dentro de un proyecto de inversión. Intenta definir al cabo de cuánto tiempo el inversor va a poder recuperar su inversión inicial.
- VAN: Valor Actual Neto. Se trata del flujo de fondos acumulado del proyecto, descontado a una determinada tasa de interés. Visualiza cuánto dinero se va a ganar (o perder) a futuro en un proyecto al realizar una inversión para el desarrollo del mismo.

La moneda utilizada en este estudio fue USD (dólar estadounidense) puesto que se tiene mayor previsibilidad de su valor a futuro que la moneda local.

## 7.2 Presentación de las tecnologías disponibles

Para realizar este análisis, se plantean dos opciones de tecnologías:

- Baja tecnología: biodigestor confeccionado en base a un rollo de polietileno tubular. Este material se consigue a un precio relativamente barato, la instalación de este tipo de biodigestor no es costosa y tan solo requiere de 2 meses de instalación y puesta en marcha para llegar a su funcionamiento en régimen. No obstante, este biodigestor tiene una limitación de capacidad debido a que el ancho de rollo de polietileno tubular máximo disponible en el mercado es de 4 metros y a que, por características de rendimiento del biodigestor, la relación (Largo / Ancho) del mismo no puede ser mayor a 10.
- Alta tecnología: biodigestor de geomembrana de HDPE. Esta tecnología es más cara por varios motivos: costo de materiales (planchas de geomembrana, agitadores, bombas de circulación de fluido), costo de excavación (se contrata una retroexcavadora que cobra por $m^3$ excavado), mayor tiempo de instalación y puesta en marcha para que se llegue a su funcionamiento en régimen (en este caso, 4 meses) y a su vez se proyecta la compra de tanques de almacenamiento de fluido (en este caso, biofertilizante) como que actúan como stock previo antes de despachar esta mercadería en fletes de camiones cisterna (costo que también está contemplado en la ecuación económica) a los correspondientes clientes.

Para construir esta estimación de escenarios, es necesario fijar ciertos parámetros que no se van a modificar en el transcurso del estudio (no obstante, queda la opción de modificarlos posteriormente para futuras líneas de investigación):

- Parámetros generales:
  - Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): 30 días.
  - Peso promedio por animal: 265 kg.
  - Peso excreta fresca / Kg peso vivo: 6% (caso bovinos).
  - Peso excreta sólida / Kg excreta fresca: 15% (caso bovinos).
  - Densidad excreta sólida: 800 kg/ $m^3$ (caso bovinos).
  - Litros agua por kg excreta sólida: 3.
  - Fracción biol / biofertilizante: 93%. Caso biosol: 7%.
  - Densidad biosol: 1650 kg/ $m^3$ (caso bovinos).
  - Capacidad de un cambión cisterna: 38 $m^3$.

- Distancia promedio de flete al mercado: 100 km. Se considera que se paga por kilómetro recorrido (200 km totales).
- Cantidad de días de producción por mes: 30 días. Se supone que el biodigestor nunca deja de estar en funcionamiento, porque el tiempo de preparación para su puesta en régimen es del orden de 45 días.
- Se asume que la fuente de agua destinada a mezclarse diariamente con la excreta sólida no supone un costo extra dentro del establecimiento, ya que se considera que el mismo debería contar con un sistema de tanque australiano y bebederos alimentados por una bomba sumergible de con suficiente potencia y capacidad para suministrar agua a los animales del establecimiento.

- Condiciones, supuestos y parámetros en baja tecnología:
  - Relación Largo / Ancho del biodigestor: 10.
  - Fracción Volumen líquido / Volumen total biodigestor: 75%.
  - Se pretende evitar la instalación de biodigestores en paralelo mediante esta tecnología ya que es preferible realizar una mejora a la siguiente tecnología para realizar tal estrategia.
  - Lagunas de biofertilizante por biodigestor: 1.
  - Relación Ancho laguna biofertilizante / Diámetro biodigestor: 2.
  - Profundidad laguna biofertilizante: 2 metros.
  - Anchos de rollo de polietileno disponibles: 1, 2, 3 y 4 metros.
  - Largo de rollo de polietileno disponible: 50m.
  - Cantidad de capas de polietileno para la confección del biodigestor: 2.
  - Días de stock de la laguna de biofertilizante: 20 días.
  - Condición venta de biofertilizante a terceros: que la producción mensual de biofertilizante supere el volumen de dos tanques cisterna. Si se cumple tal condición, se despacha un flete mensual con 38 $m^3$ de biofertilizante destinado a la venta.
- Condiciones, supuestos y parámetros en alta tecnología:
  - Relación Largo / Ancho del biodigestor: 8
  - Fracción Volumen líquido / Volumen total biodigestor: 75% aprox.
  - Máximo volumen de líquido permitido por unidad de biodigestor: 1200 $m^3$. Cuando se supera ese volumen no se amplían las dimensiones del biodigestor original, si no que se instalan dos biodigestores de menor capacidad idénticos en paralelo. Cuando cada uno de estos llega a 1200 $m^3$ de líquido almacenado, se procede de la misma manera y en este caso se

construyen tres biodigestores de menor capacidad idénticos en paralelo. Y así sucesivamente.

- Lagunas de biofertilizante por cantidad de biodigestores: 1.
- Relación Ancho laguna biofertilizante / Ancho biodigestor: 1.
- Profundidad laguna biofertilizante: profundidad zanja biodigestor.
- Ángulo de talud de la zanja trapezoidal: 65°.
- Porcentaje de truncado de la zanja: 60%.
- Relación tiempo de permanencia en laguna biofertilizante / TRH: 20%.
- Supuesto: se comercializa todo lo que se vende. Y en el caso de que se decida consumirse en el propio establecimiento, se contempla como un ahorro que reduce la compra de insumos -en este caso, fertilizante- a terceros.
- Capacidad de tanques para stock de biofertilizantes disponibles: 10, 15 y 26 $m^3$.
- Cantidad de agitadores: dos por cada unidad de biodigestor y uno adicional en el caso de que el volumen de mezcla diario a ingresar supere los 3 $m^3$.
- Cantidad de bombas centrífugas para circulación de biofertilizante: 2.
- Merma geomembrana HDPE: 10%.

No es propósito de este trabajo profundizar en detalles, pero también se dimensionó el sistema de tuberías necesario para cada esquema. Los materiales destacados dentro de este sistema son los siguientes:

- Tubería PVC 6” para circulación de biomasa y biofertilizante.
- Tubería PVC ½” para conducción de biogás.
- Codos de PVC, flanges, T’s y llaves de paso para las dos medidas.

Además, con el objetivo de dimensionar este sistema de tuberías para el caso de la alta tecnología, se fijaron las distancias entre los distintos componentes del sistema a instalar. A modo de ejemplo, algunas de estas distancias son:

- Distancia entre biodigestor y laguna: 2 metros.
- Distancia entre sistemas biodigestor-laguna: 4 metros.
- Distancia entre caja de mezcla y biodigestor: 2 metros.
- Distancia entre laguna y tanque de biofertilizante: 2 metros.
- Distancia entre laguna y salida de recolección de biosol: 2 metros.
- Distancia entre biodigestor y reservorio de biogás: 2 metros.

## 7.3 Detalle de la inversión inicial y estructura de costos mensuales

Una vez determinados las constantes físicas y los supuestos del estudio de factibilidad se procede a detallar los componentes de la inversión inicial y la estructura de costos estimados en cada situación:

- Variables económicas y estimaciones costos generales:
  - IVA inversión, costos y ventas: 21%.
  - TNA: 4% en USD.
  - Período estimado de duración del proyecto: 5 años (60 meses).
  - Precio estimado de venta biol: 7 USD/ton.
  - Precio estimado de venta biosol: 130 USD/ton.
  - Costo de administración y comercialización: 10% sobre ingresos brutos.
  - Costo flete: 2.50 USD/km.
- Baja tecnología:
  - Inversión inicial:
    - Excavación zanja (manual): 2 USD/ $m^3$.
    - Costo rollo polietileno (largo: 50m, espesor: 0.2mm):
      - Ancho de Rollo 1m: 24 USD/u.
      - Ancho de Rollo 2m: 32 USD/u.
      - Ancho de Rollo 3m: 43 USD/u.
      - Ancho de Rollo 4m: 57.5 USD/u.
    - Plancha de cemento de 0.2m de espesor: 14.60 USD/$m^2$.
  - Costo energía y mantenimiento: 3% sobre ingresos brutos.
- Alta tecnología:
  - Inversión inicial:
    - Excavación zanja (vía retroexcavadora): 5 USD/ $m^3$.
    - Costo membrana HDPE: 2.92 USD/$m^2$.
    - Costo tanque de biofertilizante:
      - Volumen 10 $m^3$: 2,600 USD/u.
      - Volumen 15 $m^3$: 3,200 USD/u.
      - Volumen 26 $m^3$: 4,300 USD/u.
    - Agitador: 1000 USD/u.
    - Bomba centrífuga: 250 USD/u.
    - Costo sellado HDPE: 0.20 USD/m.
    - Costo canaleta de cemento: 2.90 USD/m.
    - Plancha de cemento de 0.2m de espesor: 14.60 USD/$m^2$.

- Costo energía y mantenimiento: 6% sobre ingresos brutos.

En el estudio también se contempló, peso a su poca relevancia dentro del costo total, al costo del sistema de tuberías requerido.

## 7.4 Presentación de las variables de control

Por último, y antes de presentar los resultados finales del estudio, se pone el foco en las dos variables a analizar:

- Cantidad de cabezas dentro del establecimiento. Este número constituye el potencial de producción de biofertilizante que se puede alcanzar. Luego de unas pruebas de factibilidad iniciales, se plantearon los siguientes escenarios, según la tecnología:
  - Baja tecnología: de 100 a 1,000 cabezas, en intervalos de 50.
  - Alta tecnología: de 1,000 a 15,000 cabezas, en intervalos de 1,000.

- Tasa de recolección de excretas. Constituye la proporción de excretas que se van a recolectar sobre las excretas totales de los animales. Este valor tiene una relevancia significativa porque no es lo mismo poder recolectar un 30% de las excretas totales que un 70%. Por ejemplo, en el caso de que los animales se encierren durante la noche, se espera que durante este lapso de tiempo estos generen alrededor de un 25% de las excretas diarias. Con respecto al estudio realizado, al principio se pensó en definirlo como un parámetro fijo (30%), pero luego se consideró que cada establecimiento pude tener distinto poder de recolección de excretas (algunos más y otros menos) por lo que se resolvió plantear cuatro escenarios distintos: 25, 50, 75 y 100%.

## 7.5 Performance de indicadores económicos en función de la tecnología de biodigestores empleada y los valores de las variables de control

Utilizando la herramienta de What If Analysis para Microsoft Excel se pudieron calcular las variables económicas para cada escenario, y se presentan a continuación.

### 7.5.1 Baja Tecnología:

| Cantidad de cabezas | Baja Tecnología | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tasa de recolección de excretas | | | | | | | |
| | 25% | | | | 50% | | | |
| | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN |
| 100 | $ -149.71 | $ 195.54 | 2.00 | $ 10,238.88 | $ -218.81 | $ 391.08 | 2.00 | $ 20,558.10 |
| 150 | $ -189.91 | $ 293.31 | 2.00 | $ 15,392.85 | $ -274.46 | $ 586.62 | 2.00 | $ 30,890.71 |
| 200 | $ -218.81 | $ 391.08 | 2.00 | $ 20,558.10 | $ -328.29 | $ 782.16 | 2.00 | $ 41,225.16 |
| 250 | $ -246.92 | $ 488.85 | 2.00 | $ 25,724.12 | $ -392.92 | $ 977.70 | 2.00 | $ 51,548.83 |
| 300 | $ -274.46 | $ 586.62 | 2.00 | $ 30,890.71 | $ -443.50 | $ 1,173.24 | 2.00 | $ 61,886.51 |
| 350 | $ -301.56 | $ 684.39 | 2.00 | $ 36,057.75 | $ -493.37 | $ 1,368.78 | 2.00 | $ 72,224.89 |
| 400 | $ -328.29 | $ 782.16 | 2.00 | $ 41,225.16 | $ -542.66 | $ 1,564.31 | 2.00 | $ 82,563.86 |
| 450 | $ -354.71 | $ 879.93 | 2.00 | $ 46,392.86 | $ -591.47 | $ 1,154.85 | 2.00 | $ 60,762.49 |
| 500 | $ -392.92 | $ 977.70 | 2.00 | $ 51,548.83 | $ -639.86 | $ 1,350.39 | 2.00 | $ 71,102.34 |
| 550 | $ -418.31 | $ 1,075.47 | 2.00 | $ 56,717.57 | $ - | $ - | | |
| 600 | $ -443.50 | $ 1,173.24 | 2.00 | $ 61,886.51 | $ - | $ - | | |
| 650 | $ -468.51 | $ 1,271.01 | 2.00 | $ 67,055.62 | $ - | $ - | | |
| 700 | $ -493.37 | $ 1,368.78 | 2.00 | $ 72,224.89 | $ - | $ - | | |
| 750 | $ -518.08 | $ 1,466.55 | 2.00 | $ 77,394.31 | $ - | $ - | | |
| 800 | $ -542.66 | $ 1,564.31 | 2.00 | $ 82,563.86 | $ - | $ - | | |
| 850 | $ -567.12 | $ 1,057.08 | 2.00 | $ 55,592.71 | $ - | $ - | | |
| 900 | $ -591.47 | $ 1,154.85 | 2.00 | $ 60,762.49 | $ - | $ - | | |
| 950 | $ -615.71 | $ 1,252.62 | 2.00 | $ 65,932.37 | $ - | $ - | | |
| 1,000 | $ -639.86 | $ 1,350.39 | 2.00 | $ 71,102.34 | $ - | $ - | | |

*Tabla 7.5.1-1. Performance de indicadores económicos - Baja Tecnología - Tasas de recolección de excretas de 25 y 50%*

| Cantidad de cabezas | Baja Tecnología | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tasa de recolección de excretas | | | | | | | |
| | 75% | | | | 100% | | | |
| | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN |
| 100 | $ -274.46 | $ 586.62 | 2.00 | $ 30,890.71 | $ -328.29 | $ 782.16 | 2.00 | $ 41,225.16 |
| 150 | $ -354.71 | $ 879.93 | 2.00 | $ 46,392.86 | $ -443.50 | $ 1,173.24 | 2.00 | $ 61,886.51 |
| 200 | $ -443.50 | $ 1,173.24 | 2.00 | $ 61,886.51 | $ -542.66 | $ 1,564.31 | 2.00 | $ 82,563.86 |
| 250 | $ -518.08 | $ 1,466.55 | 2.00 | $ 77,394.31 | $ -639.86 | $ 1,350.39 | 2.00 | $ 71,102.34 |
| 300 | $ -591.47 | $ 1,154.85 | 2.00 | $ 60,762.49 | $ - | $ - | | |
| 350 | $ -733.50 | $ 1,448.16 | 2.00 | $ 76,203.06 | $ - | $ - | | |
| 400 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 450 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 500 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 550 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 600 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 650 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 700 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 750 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 800 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 850 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 900 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 950 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |
| 1,000 | $ - | $ - | | | $ - | $ - | | |

*Tabla 7.5.1-2. Performance de indicadores económicos - Baja Tecnología - Tasas de recolección de excretas de 75 y 100%*

### 7.5.2 Alta Tecnología:

| Cantidad de cabezas | Alta Tecnología | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tasa de recolección de excretas | | | | | | | |
| | 25% | | | | 50% | | | |
| | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN |
| 1,000 | $ -15,629.25 | $ 72.97 | - | $ -11,845.21 | $ -18,191.89 | $ 750.93 | 29.00 | $ 20,277.59 |
| 2,000 | $ -18,191.89 | $ 750.93 | 29.00 | $ 20,277.59 | $ -20,583.28 | $ 1,501.87 | 18.00 | $ 56,303.20 |
| 3,000 | $ -19,421.19 | $ 823.90 | 28.00 | $ 22,784.50 | $ -22,785.94 | $ 2,252.80 | 14.00 | $ 92,516.91 |
| 4,000 | $ -20,583.28 | $ 1,501.87 | 18.00 | $ 56,303.20 | $ -30,088.31 | $ 3,608.73 | 12.00 | $ 154,592.66 |
| 5,000 | $ -21,700.87 | $ 2,179.83 | 14.00 | $ 89,866.26 | $ -37,322.09 | $ 4,359.66 | 12.00 | $ 185,791.97 |
| 6,000 | $ -22,785.94 | $ 2,252.80 | 14.00 | $ 92,516.91 | $ -39,302.67 | $ 5,110.60 | 11.00 | $ 222,227.02 |
| 7,000 | $ -29,048.80 | $ 2,930.76 | 14.00 | $ 120,951.79 | $ -52,793.24 | $ 6,466.53 | 12.00 | $ 278,135.14 |
| 8,000 | $ -30,088.31 | $ 3,608.73 | 12.00 | $ 154,592.66 | $ -60,286.35 | $ 7,217.46 | 12.00 | $ 309,075.97 |
| 9,000 | $ -31,110.90 | $ 3,681.70 | 12.00 | $ 157,305.59 | $ -62,542.33 | $ 7,968.39 | 12.00 | $ 345,236.54 |
| 10,000 | $ -37,322.09 | $ 4,359.66 | 12.00 | $ 185,791.97 | $ -69,972.31 | $ 8,719.33 | 12.00 | $ 376,240.29 |
| 11,000 | $ -38,317.84 | $ 5,037.63 | 11.00 | $ 219,476.46 | $ -77,377.24 | $ 10,075.26 | 11.00 | $ 438,213.83 |
| 12,000 | $ -39,302.67 | $ 5,110.60 | 11.00 | $ 222,227.02 | $ -79,557.21 | $ 10,826.19 | 11.00 | $ 474,450.15 |
| 13,000 | $ -45,480.81 | $ 5,788.56 | 12.00 | $ 250,746.34 | $ -86,920.71 | $ 11,577.12 | 11.00 | $ 505,520.16 |
| 14,000 | $ -52,793.24 | $ 6,466.53 | 12.00 | $ 278,135.14 | $ -97,441.91 | $ 12,933.06 | 11.00 | $ 564,387.78 |
| 15,000 | $ -53,942.95 | $ 6,539.49 | 12.00 | $ 280,721.36 | $ -105,096.18 | $ 13,683.99 | 11.00 | $ 595,168.00 |

*Tabla 7.5.2-1. Performance de indicadores económicos - Alta Tecnología - Tasas de recolección de excretas de 25 y 50%*

| Cantidad de cabezas | Alta Tecnología | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tasa de recolección de excretas | | | | | | | |
| | 75% | | | | 100% | | | |
| | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN | Inversión inicial | Ingresos Netos mensuales | Período de repago descontado | VAN |
| 1,000 | $ -19,421.19 | $ 823.90 | 28.00 | $ 22,784.50 | $ -20,583.28 | $ 1,501.87 | 18.00 | $ 56,303.20 |
| 2,000 | $ -22,785.94 | $ 2,252.80 | 14.00 | $ 92,516.91 | $ -30,088.31 | $ 3,608.73 | 12.00 | $ 154,592.66 |
| 3,000 | $ -31,110.90 | $ 3,681.70 | 12.00 | $ 157,305.59 | $ -39,302.67 | $ 5,110.60 | 11.00 | $ 222,227.02 |
| 4,000 | $ -39,302.67 | $ 5,110.60 | 11.00 | $ 222,227.02 | $ -60,286.35 | $ 7,217.46 | 12.00 | $ 309,075.97 |
| 5,000 | $ -53,942.95 | $ 6,539.49 | 12.00 | $ 280,721.36 | $ -69,972.31 | $ 8,719.33 | 12.00 | $ 376,240.29 |
| 6,000 | $ -62,542.33 | $ 7,968.39 | 12.00 | $ 345,236.54 | $ -79,557.21 | $ 10,826.19 | 11.00 | $ 474,450.15 |
| 7,000 | $ -71,076.20 | $ 9,397.29 | 11.00 | $ 409,817.00 | $ -97,441.91 | $ 12,933.06 | 11.00 | $ 564,387.78 |
| 8,000 | $ -79,557.21 | $ 10,826.19 | 11.00 | $ 474,450.15 | $ -112,733.37 | $ 14,434.92 | 12.00 | $ 625,965.23 |
| 9,000 | $ -96,209.35 | $ 12,255.09 | 12.00 | $ 530,939.31 | $ -122,759.16 | $ 16,541.79 | 11.00 | $ 723,735.66 |
| 10,000 | $ -105,096.18 | $ 13,683.99 | 11.00 | $ 595,168.00 | $ -132,731.74 | $ 18,043.65 | 11.00 | $ 790,614.31 |
| 11,000 | $ -113,944.52 | $ 15,112.89 | 11.00 | $ 659,435.03 | $ -158,568.56 | $ 20,150.52 | 12.00 | $ 872,626.25 |
| 12,000 | $ -122,759.16 | $ 16,541.79 | 11.00 | $ 723,735.66 | $ -169,053.36 | $ 22,257.38 | 11.00 | $ 969,939.19 |
| 13,000 | $ -131,543.91 | $ 17,970.69 | 11.00 | $ 788,066.08 | $ -179,497.19 | $ 23,759.25 | 11.00 | $ 1,036,348.16 |
| 14,000 | $ -150,707.69 | $ 19,399.58 | 11.00 | $ 842,051.95 | $ -202,194.41 | $ 25,866.11 | 12.00 | $ 1,121,489.27 |
| 15,000 | $ -159,893.12 | $ 20,828.48 | 11.00 | $ 905,983.02 | $ -218,348.93 | $ 27,367.98 | 12.00 | $ 1,182,206.51 |

*Tabla 7.5.2-2. Performance de indicadores económicos - Alta Tecnología - Tasas de recolección de excretas de 75 y 100%*

## 7.6 Análisis y conclusiones del caso de estudio

Observando los resultados económicos del estudio de factibilidad para ambas tecnologías en función del número de cabezas bovinas y la tasa de recolección de excretas, se puede concluir las siguientes afirmaciones:

### 7.6.1 Baja tecnología:

- A menor volumen de producción, menores ingresos netos, pero a su vez disminuye fuertemente la inversión inicial requerida, por lo cual esta tecnología es ideal en términos económicos (período de repago de 2 meses) para un número reducido del nivel de cabezas.
- El máximo nivel de producción para esta tecnología queda determinado, como se mencionó anteriormente, por los anchos de rollo de polietileno tubular disponibles en el mercado y la relación (Largo / Ancho) del biodigestor, que por cuestiones de rendimiento del mismo no puede ser mayor a 10 en estos casos. Según la tasa de recolección de excretas, estos son los máximos números de cabezas admisibles para aplicar esta tecnología:

| Tasa de recolección de excretas | 25% | 50% | 75% | 100% |
|---|---|---|---|---|
| Máx. número admisible de cabezas (aprox.) | 1080 | 500 | 350 | 270 |

*Tabla 7.6.1-1. Máximos niveles de producción – Baja Tecnología*

### 7.6.2 Alta tecnología:

- Lo primero que se debe señalar es el alto período de repago de la inversión (entre 11 y 12 meses en el mejor de los casos) en alta tecnología en comparación a la baja tecnología. Esto se debe principalmente a dos factores: la inversión inicial es mucho mayor y el nivel de costos mensuales también es más alto (entre los cuales se destaca el costo de flete de biofertilizante), lo que hace que los ingresos netos mensuales no sean lo suficientemente altos para paliar la inversión inicial en el cálculo del VAN del proyecto. Esta situación se acentúa más a menor número de cabezas y a menor tasa de recolección, quedándose definidos los mínimos admisibles recomendados de cabezas para aplicar esta tecnología de la siguiente manera:

| Tasa de recolección de excretas | 25% | 50% | 75% | 100% |
|---|---|---|---|---|
| Min. número admisible de cabezas (aprox.) | 5000 | 3000 | 2000 | 1500 |

*Tabla 7.6.2-1. Mínimos niveles de producción – Alta Tecnología*

- Para altos niveles de producción, los ingresos netos mensuales crecen en mayor proporción que la inversión inicial y esto provoca que el VAN del proyecto aumente. A su vez, en estos casos al poseer una gran escala de producción habría que estudiar con mayor detalle la estructura de costos, puesto que con mayor volumen se puede lograr una mayor amortización de los mismos (en particular, los costos fijos) y de esta manera el VAN del proyecto en esta situación podría resultar más alto, y el período de repago, más bajo.

# 8 CONCLUSIONES

La aplicación de la tecnología de biodigestores en establecimientos de feedlot no sólo contribuye a disminuir el impacto ambiental de los mismos, sino que también es ideal para generar ahorros económicos comercializando biofertilizantes y, eventualmente, biogás. Un escenario representativo para destacar estos potenciales ahorros sería dimensionar el intercambio de biofertilizante con los proveedores de granos (por ejemplo, de maíz), y de esta manera el feedlot podría obtener esta materia prima determinante a un costo mucho menor, lo que mejoraría enormemente la rentabilidad del negocio y constituiría una importante ventaja competitiva frente a otros jugadores del mercado.

Por otra parte, se resalta la importancia de la diferenciación que se realizó entre baja y alta tecnología para el análisis de factibilidad del caso de estudio de este Proyecto, ya que se considera que, por las características del caso, no es conveniente seleccionar el mismo tipo de tecnología para niveles de producción tan desparejos en su magnitud. Por ello, se intentó abordar los feedlots de 100 a 1000 cabezas con la implementación de baja tecnología, y de 1000 a 15000 con la aplicación de alta tecnología.

Por último, quedan mencionadas a continuación para futuras líneas de investigación distintas alternativas a estudiar para mejorar el retorno del proyecto de alta tecnología (instalación de biodigestores de geomembrana de HDPE):

- El impacto del costo del flete de biofertilizante es muy alto e incide significativamente en los resultados económicos generales del proyecto. Habría que realizar un estudio pormenorizado de la demanda futura de clientes cercanos al establecimiento, y evaluar alternativas para reducir ese costo.
- Evaluar distintos métodos de recolección de desechos orgánicos, para automatizarlo al máximo y no incurrir en elevados costos de mano de obra.
- El acceso a pequeños y medianos créditos de inversión también resulta un factor esencial a tener en cuenta aunque en el caso de estudio anterior dicha opción se haya desestimado.
- Estudio de factibilidad de comercialización de biogás. Si bien se debería incurrir en costos de limpieza (filtración de $CO_2$, vapor de agua y $H_2S$), compresión, transporte y descompresión, puede llegar ser una alternativa a analizar debido a los grandes volúmenes de biogás producidos y a la potencial demanda de este insumo de pueblos que nunca van a tener acceso a gas natural y que en la actualidad se abastecen de gas a partir de tubos de GLP (propano-butano). Todo esto

potenciado por una posible crisis energética en el futuro dada por el agotamiento de fuentes de recursos no renovables y la necesidad del uso de energías renovables.

- Existe la posibilidad de abastecer de electricidad a la red, a partir de la conversión del biogás en energía eléctrica. Por supuesto, se debería dimensionar el generador eléctrico requerido, sus costos asociados y el retorno esperado de este proyecto de inversión adicional, el cual quedaría determinado en gran parte por el precio del KW que pagaría el Estado o la empresa privada a la cual se le abastece la energía eléctrica.

# 9 BIBLIOGRAFÍA


- Material del Curso de Biodigestores de la Fundación Energizar:
  - Capítulo 1: “Introducción a la fermentación anaeróbica”.
  - Capítulo 2: “Sistemas de generación de biogás”.
  - Capítulo 3: “Productos obtenidos de un biodigestor”.
  - Capítulo 4: “Contexto socio-cultural”.
  - Capítulo 5: “Diseño de un biodigestor”.
  - Capítulo 6: “Desarrollo a nivel mundial y regional”.
- Papers:
  - “Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación.” (Jaime Martí Herrero).
  - “Biogas production from maize and dairy cattle manure - Influence of biomass composition on the methane yield” (Thomas and Barbara Aimon)
  - “Ferrocemento en la construcción de biodigestores familiares y biodigestores secuenciales” (INTA).
  - “Manual de biogás” (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD-, FAO).
  - “Desafíos y Estrategias para implementar la Digestión Anaeróbica en los Agrosistemas” (INTA).
  - “Ingeniería asociada a la producción de biogás” (Antonio Sanmartín Arana).
  - “Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación operación y utilización” (Raúl Botero y Thomas R. Preston).
  - “Producción de energía renovable (biogás) a partir de estiércol del ganado bovino en la Estación Experimental Agraria El Porvenir” (Proyecto Biosinergia – SNV).
  - “Diseño del sistema de generación de energía eléctrica en la comunidad de Santa Rosillo, a partir de la producción local de biogás” (Proyecto Biosinergia – SNV).
- Tesis:
  - “Diseño y aplicación de biodigestores”.
  - “Explorar las oportunidades de producción y explotación de plantas de biogás para pequeños productores en Argentina”.
  - “Estudio de factibilidad de la incorporación de biodigestores a feedlots, basado en la obtención de subproductos con una importante contribución al medio ambiente”.
  - “Uso de biodigestores para el tratamiento de residuos orgánicos y generación de energía. Caso de estudio ‘Estancia María Pilar’ ”.
  - “Recuperación de biogás en establecimientos de cría intensiva de cerdos. Descripción de la tecnología. Perspectivas a nivel país. Estudio de un caso.”

- Sitios web:
  - www.sciencedirect.com
  - www.energizar.org.ar
  - www.inta.gob.ar
  - www.ecrsolar.com
  - www.produccion-animal.com.ar
  - www.snvworld.org/es/regions/latin-america
  - www.produccion-animal.com.ar
  - http://www.cpia.org.ar/agropost/201308/nota10.html
  - http://www.profertilnutrientes.com.ar/productos.html

- Videos:
  - "Proyecto Biosinergia Haciendo Perú":
    - Parte I: http://www.youtube.com/watch?v=K1jnugZJZUI
    - Parte II: http://www.youtube.com/watch?v=x-taF8Ctlbg
  - "Biodigestor Construcción, Methane Biogas Digester"
    - Parte I: http://www.youtube.com/watch?v=hjoSNv_plZQ
    - Parte II: http://www.youtube.com/watch?v=_EGBedmljM0
  - "Biogas Bolivia: Instalación de un biodigestor en altiplano (+Manual)"
    - http://www.youtube.com/watch?v=3Sl0XEN5Bgo