



**Universidad Tecnológica Nacional**

**Facultad Regional Tucumán**

# **Diseño de un biodigestor tubular flexible para la producción de biogás a partir de desechos porcinos generados en una granja con sistema de ciclo completo**

**Tesis**

**MAESTRIA EN INGENIERÍA BIOENERGÉTICA**

**Maestrando:** Esp. Ing. Qco. José Ulises Diez Gómez

**Director:** Dr. Carlos Gusils

**Co-Director:** Dr. Daniel Machado

San Miguel de Tucumán

21 de Diciembre de 2020

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**FACULTAD REGIONAL TUCUMAN**

DECANO

Mg. Ing. Walter Fabián Soria

VICEDECANO

Esp. Ing. Juan Esteban Campos

Escuela de Postgrado

Directora

Dra. Marta Pesa

Maestría en Ingeniería Bioenergética

Director

Ing. Gerónimo Julio Cárdenas

Vicedirector

Dr. Carlos Gusils León

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi madre en quien veo mi referente de esfuerzo y de lucha, a mis hijas que son la inspiración y la motivación de mis logros y a todas las personas que a lo largo de los años aparecieron en mi vida para empujarme hacia adelante y no me dejaron bajar los brazos.

## ÍNDICE

Lista de tablas .....	6
Lista de figuras .....	9
Resumen.....	11
Palabras clave.....	12
Introducción.....	13
Justificación del trabajo.....	19
Estado del arte .....	20
Biodigestores.....	20
Antecedentes .....	21
Microbiología de la digestión anaeróbica .....	25
Hidrólisis y fermentación.....	26
Acetogénesis y deshidrogenación .....	28
Metanogénesis.....	29
Fundamentos para el desarrollo del modelo .....	31
Estequiometría de la digestión anaeróbica .....	33
Cinética del crecimiento bacteriano .....	35
Factores ambientales a controlar en la digestión anaeróbica .....	37
Tipo de sustrato y contenido de nutrientes.....	38
Características de los sustratos para digestión anaeróbica:.....	49
Características de los residuos porcinos.....	52
El biogas .....	54
Acondicionamiento del biogás .....	57
Remoción de CO <sub>2</sub> :.....	57
Remoción de agua .....	57
Remoción del H <sub>2</sub> S .....	58
Remoción del amoníaco.....	59
Usos del biogás:.....	59
Generación de energía eléctrica .....	59
Hipotesis .....	61

Objetivos .....	62
Materiales y métodos.....	63
Resultados y discusiones .....	73
Generación de purines .....	80
Metodología de dimensionado y diseño del sistema de tratamiento	81
Recomendaciones de instalación de biodigestores tubulares 1 y 2.	109
Comparativa de impactos ambientales del proyecto .....	122
Conclusiones.....	126
Referencias .....	129

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Emisiones de GEI de los cinco principales subsectores o actividades en la República Argentina .....	14
Tabla 2. Variación de emisiones GEI de la actividad ganadera de la República Argentina .....	18
Tabla 3. Constantes cinéticas empleadas en el modelo de cálculo .....	37
Tabla 4. Tiempos medios de retención celular sugeridos para utilizar en el diseño de digestores de mezcla completa .....	41
Tabla 5. Tiempo de retención Hidráulico para algunos tipos de estiércoles para el rango mesofílico.....	41
Tabla 6. Efectos de la concentración de nitrógeno amoniacal en el tratamiento anaeróbico.....	46
Tabla 7. Efecto de la concentración de cationes alcalino y alcalino-térreos .....	47
Tabla 8. Resumen de elementos inhibidores del proceso anaeróbico y sus concentraciones correspondientes. ....	47
Tabla 9 Producción de estiércol de distintas especies animales y la producción de biogás referida a los sólidos volátiles. ....	50
Tabla 10. Relación Carbono/ Nitrógeno de diversos sustratos orgánicos .....	51
Tabla 11. Porcentaje promedio de ST en diferentes residuos animales. ....	51
Tabla 12. Concentración media de los principales parámetros de los purines de cerdo. ....	53
Tabla 13. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica.....	54
Tabla 14. Componentes del biogás en función del sustrato empleado. ....	55
Tabla 15. Equivalencia del biogás de 5500 Kcal/m <sup>3</sup> con otros combustibles. ...	56
Tabla 16. Energía equivalente del biogás (65% CH <sub>4</sub> y 35% CO <sub>2</sub> ) vs otros combustibles gaseosos .....	56
Tabla 17. Distribución de animales según el ciclo de cría.....	75

Tabla 18. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica .....	80
Tabla 19. Volúmenes de purín producidos de acuerdo a la etapa fisiológica. ...	81
Tabla 20. Valores de caracterización de muestra purín de cerdo .....	81
Tabla 21. Valores de caracterización de lodos anaeróbicos de la laguna recolectora de las etapas de reproducción, maternidad y engorde. ....	82
Tabla 22. Relación de agua de limpieza/purín y factor de dilución. ....	85
Tabla 23. Estimación de caudales a tratar en cada biodigestor .....	85
Tabla 24. Resumen de las variables de diseño Biodigestor 1 y 2. ....	86
Tabla 25. Resumen de las variables de diseño Biodigestor 3.....	86
Tabla 26. Volúmenes hidráulicos de los biodigestores propuestos. ....	87
Tabla 27. Detalle de variables de funcionamiento de los biodigestores con su correspondiente eficiencia en la remoción de DQO, volumen de CH <sub>4</sub> y Biogas producidos. ....	88
Tabla 28. Producción de CH <sub>4</sub> y Biogas de Biodigestores 1, 2 y 3 empleando método simplificado AME.....	88
Tabla 29. Parámetros de dimensionado de zanjas de biodigestores tubulares a partir de del ángulo $\alpha$ y el radio de la circunferencia de manga tubular.....	91
Tabla 30. Determinación de la relación L/D para silobolsas de 6ft y 9ft de diámetro para los biodigestores 1 y 2.....	92
Tabla 31. Determinación de la relación L/D para silobolsas de 6ft y 9ft de diámetro para el biodigestor 3.....	92
Tabla 32. Comparación de volumen de gasómetro (VG) y volumen de biogás producido en biodigestores 1 y 2. Relación VHR/VTR=0,75.....	93
Tabla 33. Dimensiones principales de biodigestores 1 y 2. ....	93
Tabla 34. Dimensiones principales de zanja de contención de biodigestores 1 y 2. ....	93
Tabla 35. Especificaciones técnicas para cañerías termofusionables para la línea de biogás. ....	98
Tabla 36. Referencias de identificación y evaluación de impactos ambientales .....	123
Tabla 37. Resumen de impactos ambientales sin biodigestores .....	124

Tabla 38. Resumen de impactos ambientales con biodigestores con la implementación del sistema de biodigestores .....	124
--	-----



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas principales de la digestión anaeróbica. ....	30
Figura 2. Relación entre el pH y la concentración de ion bicarbonato a temperatura de 35°C.....	42
Figura 3. Principales equipos para biogás y sus respectivos consumos y equivalente energético del biogás.....	60
Figura 4. Vista satelital del Establecimiento Ayala, Granja La Virginia. ....	73
Figura 5. Esquema de corral sobre fosa con recolección de deyecciones animales y residuos .....	74
Figura 6. Etapa de reproducción. ....	75
Figura 7. Etapa de maternidad.....	75
Figura 8. Etapa de recría.....	75
Figura 9. Etapa de engorde y terminación. ....	75
Figura 10 Distribución de etapas de producción porcina de La Virginia. ....	76
Figura 11 Distribución de etapas de producción porcina y ubicación de lagunas de La Virginia. ....	77
Figura 12. Laguna recolectora de purines de cerdo provenientes de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (capacidad 4000 m <sup>3</sup> ). ....	78
Figura 13. Laguna recolectora de purines provenientes de la etapa de recría (capacidad 600 m <sup>3</sup> ). ....	78
Figura 14. Distribución de etapas de producción de La Virginia y ubicación propuesta de los biodigestores. ....	83
Figura 15. Dimensiones principales de zanja trapezoidal .....	90
Figura 16. Esquema de cuba ecualizadora de alimentación a biodigestores. ....	94
Figura 17. Esquema de zanja de contención trapezoidal .....	95
Figura 18. Esquema de cuba de salida de biodigestores .....	96
Figura 19. Especificación técnicas de las cañerías temofusionables Aqua-System.....	97
Figura 20. Bomba centrífuga para agitación de mezcla marca Fluvial.....	99

Figura 21. Esquema de válvula de seguridad de biogás.....	<b>100</b>
Figura 22. Esquema de filtro de retención de sulfuro de hidrógeno .....	<b>101</b>
Figura 23 Diagrama de flujos propuesto. Biodigestores tubulares 1 y 2 en paralelo de 9 ft de diámetro. ....	<b>103</b>
Figura 24. Detalle interno de biodigestor disposición de cañerías. ....	<b>104</b>
Figura 25. Detalle de cañerías de alimentación y salida de biodigestores.. ....	<b>105</b>
Figura 26. Vista en detalle de instalación de biodigestor tubular con sus componentes .....	<b>106</b>
Figura 27. Vista en detalle de instalación de biodigestor tubular con cubierta protectora, soplador de biogás y antorcha de quemado. ....	<b>107</b>
Figura 28. Plano de la instalación de tratamiento y generación de biogás con biodigestores tubulares en paralelo.....	<b>108</b>
Figura 29. Esquema de dimensiones de zanja de contención de sección trapezoidal. ....	<b>112</b>
Figura 30. Brida de conexión de polipropileno para salida de biogás .....	<b>114</b>
Figura 31. Dimensiones principales de zanja en función del tamaño del biodigestor. ....	<b>120</b>
Figura 32. Esquema básico de todos los componentes que conforman un biodigestor tubular. ....	<b>121</b>

## RESUMEN

El cambio climático global es una de las amenazas con las que se enfrenta hoy la humanidad. A partir de la revolución industrial, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera se han incrementado rápidamente. Las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen directamente a la emisión de GEI, siendo esta última, después del sector energético, la actividad más comprometida. En la actividad ganadera la emisión de metano se debe principalmente a la fermentación entérica y las excreciones de los animales.

El caso de estudio para el trabajo de tesis fue una granja de cerdos ubicada en la localidad de La Ramada de Abajo en el departamento Burruyacú, donde se realiza la explotación porcina intensiva con un sistema de producción de ciclo completo sobre pisos con desnivel a canales de recolección y sobre fosa, es decir, los animales están alojados en corrales sobre piso enrejado por los que caen las deyecciones, el agua de limpieza y el desecho, tanto de alimentos como de agua de bebida de los animales, de manera que se produce una gran cantidad de estiércol denominado **purín** de consistencia casi líquida pero con una elevada carga en materia orgánica, nitrógeno y fósforo principalmente.

El propósito de este trabajo fue el diseño de un sistema de digestión anaeróbica para producir biogás por medio de un biodigestor tubular flexible, el cual podrá ser empleado en el emprendimiento para generar energía térmica reemplazando parcial o totalmente los combustibles fósiles que se emplean actualmente. Con la implementación del proyecto de producción de biogás por medio de la digestión anaeróbica se busca reducir el impacto ambiental y generar combustible alternativo proveniente de fuentes renovables para ser empleado en el propio emprendimiento en remplazo de parte de la energía convencional consumida. El diseño se basó en el concepto de la mínima utilización de energía para el mantenimiento del sistema y maximizar el beneficio de la generación energética a partir de los desechos porcinos de la granja.

El empleo de biodigestores tubulares flexibles para tratar efluentes de emprendimientos de producción porcina de ciclo completo en corral ubicados en zonas de clima subtropical es una alternativa viable, práctica, de bajo nivel de

mantenimiento, relativamente económica en comparación con otros tipos de instalaciones y flexibles desde el punto de vista de su ampliación o reducción de capacidad por instalación de digestores en paralelo con un empleo de superficie reducida.

Los biodigestores flexibles serían una excelente alternativa para emprendimientos medianos a chicos de cría porcina en corral donde la captación de los desechos puede hacerse prácticamente en un 100%. La inversión inicial no es elevada, son fáciles de mantener y operar, producen ahorro de energía y reducen los impactos ambientales asociados al manejo de los desechos.

## **PALABRAS CLAVE**

Producción de Biogás

Digestión anaeróbica

Biodigestor Tubular Flexible

Sistema de producción porcina de ciclo completo

## INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables (solar, eólica, biocombustibles líquidos, biogás, etc.) se está expandiendo alrededor del mundo debido a varias razones, algunas relacionadas al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, al crecimiento demográfico con concentración en las grandes urbes con el correspondiente incremento de demanda energética y otras relacionadas al cuidado del medio ambiente y al control del calentamiento global.

El cambio climático global es una de las amenazas con las que se enfrenta hoy la humanidad. A partir de la revolución industrial, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera se han incrementado rápidamente. Las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen directamente a la emisión de GEI, siendo esta última, después del sector energético, la actividad más comprometida, aportando el 21,6% de las emisiones totales del Argentina con 78,63 MtCO<sub>2</sub>eq (millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente) de las cuales 53,67 MtCO<sub>2</sub>eq provienen de la fermentación entérica, 3,93 MtCO<sub>2</sub>eq de la gestión del estiércol y 21,04 MtCO<sub>2</sub>eq de la descomposición de excretas en pasturas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2019).

En la Tabla 1 se detallan los cinco subsectores o actividades de mayor aporte de GEI en la Argentina:

Tabla 1. Emisiones de GEI de los cinco principales subsectores o actividades en la República Argentina (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2019).

Subsector	Emisiones de GEI	
	MtCO <sub>2</sub> eq	%
<b>Ganadería</b>	78,63	21,6
<b>Transporte</b>	50,22	13,8
<b>Generación de electricidad</b>	47,83	13,1
<b>Cambio de uso de suelo y silvicultura</b>	35,77	9,8
<b>Combustibles industrias</b>	33,26	9,2

En la actividad ganadera la emisión de metano debe principalmente a la fermentación entérica y las excreciones de los animales.

Es importante tener en cuenta que los animales rumiantes, como por ejemplo los vacunos y los ovinos, son fuentes significativas de metano mientras que los no rumiantes aportan menores cantidades. Esto se debería a que en los animales no rumiantes (porcinos, equinos, mulares, asnales) la fermentación microbiana ocurre en el intestino grueso, con una capacidad de producción de metano mucho menor que el rumen

En la fermentación entérica, considerada como un proceso digestivo donde se genera metano principalmente por la acción microbiana al metabolizar los carbohidratos a moléculas simples para ser absorbidas hasta el flujo sanguíneo.

El manejo del estiércol del ganado produce emisiones de metano y de óxido nitroso. El metano se produce mediante la descomposición anaeróbica del estiércol, mientras que el óxido nitroso se produce como parte del ciclo del nitrógeno, a través de la desnitrificación del nitrógeno orgánico presente en el estiércol y en la orina del ganado.

Teniendo en cuenta la forma de disposición del estiércol se promueve la producción de metano. Cuando son colocados en sistemas donde se trabaja en condiciones anaeróbicas (por ejemplo, en forma líquida en lagunas, tanques o fosas), la descomposición de la materia orgánica tiende a producir metano. En

cambio, cuando el estiércol se maneja en forma sólida (por ejemplo, almacenamiento en pilas) o queda depositado sobre las pasturas y los campos naturales, tiende a descomponerse aeróbicamente, lo que produce muy poco o nada de metano, con una generación de cantidades importantes de  $N_2O$ , gas que tiene un potencial de calentamiento 310 veces superior al metano ( $CH_4$ ). Este es un problema importante ya que las excretas en pasturas representaron el 26,8% de las emisiones de la ganadería en el año 2019 (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2019).

Es posible promover la generación de metano por medio de programas de gestión de estiércol. Estas condiciones ocurren cuando se manejan grandes cantidades de animales en una zona o espacio confinado, como tambos, granjas de cerdos, de aves, etc.

Durante los últimos dos años las emisiones totales de la ganadería se han incrementado casi un 3%, con un marcado incremento de las emisiones producidas por la gestión del estiércol, lo que representaría una gran oportunidad para la generación de biogás porque indica que la generación de desechos de la ganadería provienen de animales en confinamiento y como se explicó anteriormente promueve condiciones anaeróbicas.

La ganadería porcina es la principal responsable de las emisiones de metano, debido a que son la especie ganadera que los animales se mantienen en nuestro país con mayor grado de confinamiento durante las etapas productivas, manejándose sus efluentes en forma líquida. (Berra G. y Finster L., 2002). Estos efluentes se acumulan generalmente en lagunas con condiciones anaeróbicas.

Por otra parte en los últimos 5 años el sector ha experimentado un importante crecimiento impulsado por el incremento nacional del consumo de carne de cerdo per cápita y las exportaciones.

El tratamiento de los desechos porcinos reviste cada día de una mayor importancia debido a la dimensión del problema que representa la degradación de los recursos naturales (agua, suelo y aire), la proliferación de plagas sinantrópicas como moscas, roedores, ente otras; y la generación de olores

indeseables producidos cuando no se realiza una correcta disposición de los desechos.

Entre algunos de los factores de contaminación ambiental podemos mencionar:

- Eutrofización de aguas superficiales.
- Problemas localizados de malos olores y polvos lo que puede generar conflictos sociales.
- Contaminación por nitratos de aguas subterráneas.
- Acidificación de aguas y suelos producida por amoníaco.
- Dispersión de metales pesados (Cu, Zn) en agua y suelo.
- Vuelco de materia orgánica no estabilizada con alto contenido de bacterias fecales, parásitos, larvas.
- Aparición de insectos y roedores.
- Emisiones descontroladas de gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.

La producción porcina en Argentina se encuentra en manos de una enorme y diversa cantidad de productores divididos principalmente en dos grandes grupos, los No Comerciales y lo Comerciales.

En el primer grupo se encuentran los pequeños productores con sistema de producción a campo o en chiquero, es decir, prácticamente sin confinamiento y cuya producción se destina a consumo propio o a la elaboración de chacinados artesanales. Este grupo concentra el 23% del total de madres.

En el segundo grupo se encuentran los productores denominados comerciales siendo estos de mayor envergadura y con sistemas productivos mixtos (a campo y en corral) para los pequeños y medianos productores, mientras que los emprendimientos grandes emplean sistemas intensivos de ciclo completo en total confinamiento concentrando el 39% del total de madres del país. (CONINAGRO, 2018). En el caso de los sistemas productivos intensivos en corral se presenta la ventaja que las emisiones de desecho por deyecciones



animales se encuentran controladas y presentan mayor facilidad su recolección y tratamiento y disposición final.

Se estima que en la Argentina existen 5.291.453 cabezas y la cantidad de madres que se consideran en estrato comercial es de 361.227. En cuanto a la distribución del stock nacional por provincia, existe una marcada concentración en las provincias de la pampa húmeda, donde Buenos Aires posee el 22,8 %, Córdoba el 21,9 % y Santa Fe el 15,2 %. El resto del país tiene el 40,1 % del stock, destacándose por su importancia Entre Ríos, Chaco, Salta y San Luis (Anuario 2018 Porcinos, Subsecretaría de Ganadería, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación con dato de SENSA).

A continuación se detalla la estimación de la producción total nacional de efluentes porcinos en Argentina (Anuario Porcinos, 2018):

- Cabezas totales: 5.291.453
- Madres que se consideran en estrato comercial: 361.227
- % de madres bajo sistemas de producción intensivos: 39 %
- % de madres sobre el total de animales en confinamiento: 10 %
- Animales en confinamiento: 1.408.780
- Producción promedio de efluentes por animal por día: 20lt

Teniendo en cuenta que la densidad del efluente en la crianza porcina, es en promedio igual a 1 (Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, 2005), se puede estimar la producción diaria de efluentes en nuestro país en alrededor de 28.176 tn, lo que representa un problema importante para nuestro país.

En la Tabla 2 se muestra la variación de emisiones GEI de la actividad ganadera de la República Argentina.

Tabla 2. Variación de emisiones GEI de la actividad ganadera de la República Argentina (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2017 y 2019).

Actividad ganadera	Emisiones GEI		
	MtCO <sub>2</sub> eq (inventario 2017)	MtCO <sub>2</sub> eq (inventario 2019)	Variación (%)
<b>Emisiones totales</b>	76,41	78,63	2,91
<b>Fermentación entérica</b>	54,00	53,67	-0,61
<b>Gestión de estiércol</b>	2,14	3,93	83,64
<b>Excretas en pasturas</b>	20,27	21,04	3,8

La producción porcina en Tucumán es desarrollada en casi todos los departamentos de la provincia, sin embargo, los que muestran un mayor avance tecnológico-empresarial se localizan en los departamentos de: Burruyacú, Leales, Trancas y Cruz Alta, donde se concentra el 65% de la actividad porcina y la mayor producción granífera, principal insumo (alimento) para el desarrollo de la actividad.

El stock de cerdos en la provincia para el año 2018, ascendió a 44.458 cabezas distribuidos entre padrillos, cerdas, lechones, capones y cachorros registrando un incremento de 36,85% respecto de 2017 (Anuario, 2017; Anuario Porcinos, 2018. Subsecretaría de Ganadería, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación).

## JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En general la carne de cerdo es una de las preferidas por los seres humanos a nivel mundial y su consumo sigue creciendo en la medida que aumenta la población y se abren nuevos mercados.

En nuestro país se observa un importante crecimiento anual tanto de cabezas producidas, como de consumo per cápita y de las exportaciones. En la Argentina las existencias de animales se incrementaron un 3,36% entre los periodos 2017 y 2018. El incremento del consumo per cápita (kg/hab/año) fue de 5,7% y el de las exportaciones un 58,7% en el mismo periodo (Anuario 2017 y Anuario 2018 Porcinos, Subsecretaría de Ganadería, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación).

En los últimos 5 años el consumo per cápita se incrementó 38,3% y las exportaciones un 206,9% lo que muestra a las claras el significativo crecimiento del sector.

Este panorama traerá como consecuencia el crecimiento de los productores actuales como así también la apertura de nuevos establecimientos.

Es de esperarse que un crecimiento en la actividad traiga aparejado un incremento en la cantidad de desechos producidos.

De no existir un tratamiento adecuado los componentes presentes en los desechos podrían afectar la calidad física, química y microbiológica del agua si son vertidos en un cuerpo receptor (arroyo, río, canal, etc.) o la calidad del suelo si se disponen sin un adecuado control, además de afectar la calidad del sustrato.

Es por ello que el desarrollo de esta tesis provee de una herramienta de bajo costo en comparación con los sistemas de tratamiento complejos para el tratamiento de los residuos de la producción porcina aprovechándolos para la generación de biogás que reemplace los consumos energéticos provenientes de fuentes no renovables o energías convencionales, mejorando la calidad de los efluentes por reducción de la carga orgánica presente, eliminación de olores y reducción del impacto ambiental.

## **ESTADO DEL ARTE**

### **BIODIGESTORES**

Los biodigestores son sistemas en los que la materia orgánica es transformada en biogás y biol o digestato por medio de la digestión anaeróbica producida por consorcios bacterianos. Se puede decir que un biodigestor sería un sistema que brinda un servicio ambiental.

Estos sistemas pueden ser de mayor o menor complejidad dependiendo de la naturaleza y tipo de materia orgánica (sustrato), volumen a tratar condiciones ambientales, etc.

El biogás producido tiene un alto valor como combustible permitiendo que el usuario pueda aprovecharlo para cocinar, producir electricidad, generar energía térmica entre otras aplicaciones.

Por otra parte, el biol o digestato es un subproducto líquido que puede tener alto valor como fertilizante ya que en el proceso de digestión anaeróbica los nutrientes como Nitrógeno (N), fósforo (P), Potasio (K), entre otros que están contenidos en la materia orgánica, se mineralizan quedando disponibles para ser aplicado sobre los cultivos minimizando las pérdidas por volatilización, aportando además fitohormonas y microorganismos beneficiosos para los cultivos (Marti Herrero J., 2019).

Por otra parte, el uso del biol reduce el empleo de fertilizantes sintéticos provenientes de procesos que emplean recursos no renovables como materia prima (por ejemplo gas natural para urea) y combustibles fósiles como fuente de energía, para transporte y distribución, además de generar un ahorro de costos .

La producción de biogás en estos digestores desplaza el uso de otros combustibles como la leña, el gas natural o el gas licuado de petróleo, reduciendo de esta forma la deforestación y el empleo de combustibles fósiles.

Los biodigestores reducen la huella de carbono asociada a los consumos energéticos y de fertilizantes de sus propios cultivos.

## ANTECEDENTES

La fermentación anaeróbica es un proceso natural donde intervienen las bacterias metanogénicas, y que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. De esta forma podemos encontrar el denominado “gas de los pantanos” que brota de las aguas estancadas, el gas natural metano de los yacimientos petrolíferos, así como el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como los bovinos.

Las primeras menciones sobre biogás se remontan al año 1600, donde los científicos lo denominaban como un gas de la descomposición de la materia orgánica (Hilbert J.A., 2011).

En 1884, Louis Pasteur presentó los trabajos de su discípulo Gayó, indicando que la fermentación de estiércoles podría ser una fuente de energía para la calefacción e iluminación. En Inglaterra en el año 1896, Donald Camerón perfeccionó el tanque séptico y utilizó el gas que se origina en el proceso como fuente de energía. En los EEUU de Norteamérica Louis P. Kinnincyutt empezó a investigar esta tecnología en Massachusetts (Guevara Vera A., 1996).

El producto principal de la digestión anaeróbica es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. La cantidad de gas producida es muy variable aunque generalmente oscila en 350 lt/kg de sólidos degradables, con un contenido de metano de 70% (Acosta L. y Obaya Abreu M., 2005).

En Alemania a partir de 1923 se empieza a utilizar biogás, mediante una red pública para satisfacer las demandas de energía. En Inglaterra, a partir de 1927 se impulsa el uso de biogás para suplir necesidades de las comunidades que pasaban de 7.000 habitantes; es aquí también, donde se introduce el sistema para recolectar gas.

Para el año 1939, la India inaugura una unidad experimental para el estudio y diseño de sistemas de equipos que requieren la utilización de biogás. Es en este país y en especial en China, donde esta tecnología se ha difundido en forma masiva en el sector campesino, existiendo más de 7.5 millones de biodigestores construidos y operando (Guevara Vera A., 1996).

Tras las guerras mundiales comienzan a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época. En todo el mundo se difunden los denominados tanques Imhoff para el tratamiento de las aguas cloacales colectivas. El gas producido se lo utilizó para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se llegó a inyectar en la red de gas comunal.

Durante los años de la Segunda Guerra Mundial comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa como en China e India que se transforman en líderes en la materia.

Esta difusión se ve interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles y recién en la crisis energética de los 70 del pasado siglo se reinicia con gran ímpetu la investigación y extensión en todo el mundo incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos.

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al avance en metodologías y en la tecnología, lo que permitió el estudio de los microorganismos intervinientes en condiciones anaeróbicas.

La aplicación del biogás en el área rural ha sido muy importante, pudiéndose diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía.

En este caso la tecnología desarrollada ha buscado construir digestores de mínimo costo y mantenimiento, fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía. Aunque en los últimos años se han

logrado resultados alentadores con biodigestores de bajo costo con buena eficiencia de producción de biogás y una vida útil aceptable.

El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo buscado en este caso es brindar energía y solucionar graves problemas de contaminación. Los digestores de alta eficiencia desarrollados para estas aplicaciones tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento.

Los reactores sencillos han tenido una amplia aceptación en China, India, Filipinas y Brasil, debido a que en estos países se ejecutaron importantes planes gubernamentales que impulsaron y apoyaron con asistencia técnica y financiera su empleo. En el resto de los países del mundo la difusión avanzada por este tipo de biodigestores no ha sido significativa (Hilbert J.A., 2011).

En Taiwán existe una gran difusión de los biodigestores flexibles o tubulares, denominándose, por lo tanto, biodigestores taiwaneses, los cuales son fabricados con diferentes tipos de membranas. Estas pueden variar en material, espesor y obviamente en costos y características. Los materiales más conocidos son el policloruro de vinilo (PVC), etileno propileno dieno tipo M (EPDM) o polietileno de alta densidad (HDPE).

Por lo general son tubos largos, que pueden ir sobre nivel o en fosa. La particularidad de este tipo de biodigestor es su fácil instalación y movilidad, no siendo necesaria gran inversión en infraestructura.

Es importante tener en cuenta que para este tipo de sistemas el espesor de membrana no debe ser inferior al 0,8 mm (FAO, 2019).

En Latinoamérica existen experiencias en el uso de biodigestores flexibles tubulares de polietileno y PVC, tanto en estudios como en proyectos como el emprendimiento Viogaz ([www.portalfruticola.com](http://www.portalfruticola.com), [en línea]) (Pedraza *et. al.*, 2002).

En Brasil existen granjas de cerdos con tratamientos de sus desechos en lagunas cubiertas con geomembranas en la parte inferior y superior para la recuperación de gases desde donde se drena la materia orgánica estabilizada como biofertilizante (biol) a un estanque receptor impermeabilizado con geomembrana para su posterior uso en campo.

En Argentina existen emprendimientos de granjas porcinas en Las Breñas, Chaco empleando silobolsas como biodigestores y geomembranas con anclaje a borde de fosa para la producción de Biogas (Acosta Sosa M., 2018).

En la provincia de Córdoba se construyeron biodigestores de silobolsas para el tratamiento de los residuos orgánicos y generación de biogás en el Mercado Frutihortícola San Miguel en la Localidad de Malagueño. (INTA EEA Manfredi, 2014).

En Posadas, Misiones; existe un biodigestor en una granja de cerdos y de producción hortícola empleado para estudio por la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y naturales de la Universidad Nacional de Misiones (Matiauda M. y Deschutter E., 2018).

El empleo de los biodigestores para la generación de biogás a partir de los desechos animales es importante por dos aspectos críticos: la producción de energía a partir de la generación de biogás y la reducción de la contaminación ambiental derivada de los vuelcos de los desechos sin tratar.



## MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica de la materia orgánica es la etapa del ciclo del carbono que se produce por la acción simbiótica de un consorcio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Esta materia orgánica generalmente es compleja y está compuesta por una mezcla de hidratos de carbono, ácidos grasos, proteínas, polímeros naturales como la celulosa, etc.

Como consecuencia de la respiración celular en condiciones anaeróbicas las bacterias producen metabolitos extracelulares dentro de los cuales los más importantes son el metano ( $\text{CH}_4$ ), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y en menor medida sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica actúan en diferentes etapas o niveles dentro de los cuáles los productos metabólicos de un determinado grupo sirven como alimento o sustrato de otros grupos lográndose así una acción simbiótica.

Dentro de este consorcio existe una porción de microorganismos anaeróbicos facultativos, los que actúan en caso de entrada de oxígeno consumiéndolo hasta estabilizar los potenciales de óxido-reducción a valores cercanos a los -300 mV y así optimizando el medio para el funcionamiento de las bacterias metanogénicas las cuales son anaeróbicas estrictas (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, parte de los residuos orgánicos se transforman en biogás que abandona el sistema.

Respecto de la energía disponible para la oxidación directa en la digestión anaeróbica, más del 90% se transforma en metano (Varnero Moreno M.T., 2011), 3-5% se pierde como calor y 5-7% es empleada en el crecimiento

bacteriano, muy inferior frente al 50% de crecimiento bacteriano de un proceso aeróbico.

Con respecto a las conversiones de carbono (C), sólo el 5% es transformado en biomasa bacteriana mientras que el restante 95% es transformado en biogás.

Para que el proceso de alimentación de una célula bacteriana pueda llevarse a cabo los nutrientes solo pueden ingresar en una forma soluble (como glucosa, aminoácidos, alcoholes, etc.) a través de la membrana citoplasmática que la recubre y salir los productos de la respiración en forma gaseosa. Es decir, las células no pueden alimentarse con polímeros de alto peso molecular como celulosa, almidones o proteínas (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

Si bien el proceso de digestión anaeróbica es complejo desde el punto de vista biológico tanto por el número de reacciones biológicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos que participan, podemos dividirlo en tres etapas principales para su comprensión.

## **HIDRÓLISIS Y FERMENTACIÓN**

En esta etapa las macromoléculas o moléculas complejas (proteínas, lípidos, carbohidratos) son hidrolizadas en condiciones anaeróbicas por bacterias hidrolíticas por medio de enzimas extracelulares (lipasas, proteasas, amilasas, celulasas, etc) adheridas a su pared celular o liberadas al medio acuoso. Estas enzimas reducen las moléculas complejas a otras más simples que son asimiladas más fácilmente por los microorganismos que intervienen en las siguientes etapas.

Los productos formados en esta etapa son monómeros o moléculas más sencillas como glucosa, aminoácidos, péptidos, galactosa, polioles, glicerol, fenoles, ácidos grasos de cadenas largas, entre otros, que a su vez experimentan una fermentación ácida produciendo butirato, propionato, acetato y en menor medida  $\text{CO}_2$ , este último entrará a la etapa de generación de  $\text{CH}_4$  por bacterias hidrogenofílicas (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica. Estas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La velocidad de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura y con la reducción de tamaño de las partículas, lo cual aumenta la superficie de contacto para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. (Varnero Moreno M.T., 2011)

Es de esperarse que los pretratamientos físicos como la trituración incrementen la velocidad de hidrólisis mejorando el proceso, reduciendo el tiempo de retención hidráulicos, y el tamaño de biodigestor.

Durante la fermentación las moléculas orgánicas solubles se transforman en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que serán oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. Este proceso también es importante porque reduce las trazas de oxígeno presentes en el sistema. El rango de pH óptimo para esta etapa es de 5,5 a 6,5.

## ACETOGÉNESIS Y DESHIDROGENACIÓN

En esta etapa actúan bacterias acetogénicas denominadas *sintróficas obligadas* debido a que necesitan la existencia de las bacterias metanogénicas para que consuman el hidrógeno producto de su metabolismo para que este siga funcionando.

Estas bacterias acetogénicas transforman los productos de la etapa anterior principalmente en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{-COOH}$ ),  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ .

De no existir las bacterias metanogénicas la producción de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  se inhibe y por lo tanto la producción de  $\text{CH}_4$ . Esto muestra la dependencia de la existencia de los distintos consorcios de microorganismos.

Los ácidos orgánicos de cadenas cortas producidos por las primeras etapas de la digestión son los compuestos de mayor importancia y son a partir de los cuales las bacterias metanogénicas producen la mayor cantidad de  $\text{CH}_4$  mediante fermentación. De estos el más importante es el  $\text{CH}_3\text{COOH}$  a partir del cual se transforma a  $\text{CH}_4$  aproximadamente el 70% de la carga orgánica inicial ( $\text{DQO}_{\text{inicial}}$ ), el segundo en importancia es el propiónico a partir del cual se forma aproximadamente el 13% en  $\text{CH}_4$ . Los otros intermedios son de menor importancia.

El  $\text{CH}_3\text{COOH}$  se produce por la fermentación de proteínas, hidratos de carbono y ácidos grasos, por eso es uno de los más abundantes dado que la mayoría de los sustratos a digerir contienen estos tres componentes en distintas proporciones dependiendo de la fuente de la cual provengan, mientras que el  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$  se forma principalmente a partir de la fermentación de hidratos de carbono y proteínas (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

Existe un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos, capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ ) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato lo que permite mantener bajas presiones parciales del

hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas (Varnero Moreno M.T., 2011).

## **METANOGENESIS**

En esta etapa actúan bacterias anaeróbicas estrictas, denominadas metanogénicas, que desde el punto de vista metabólico son las únicas capaces de producir CH<sub>4</sub> metabolizando los productos generados en las etapas anteriores.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas.

Estas bacterias son de crecimiento muy lento y son las que en general limitan el proceso de estabilización y producción de CH<sub>4</sub>. Presentan una alta sensibilidad a la presencia de oxígeno aún en pequeñas concentraciones.

Además, requieren de aportes externos de energía (en forma de calor) para llevar adelante sus procesos metabólicos y son altamente sensibles a los cambios en el ambiente (pH y temperatura) (FAO, 2019).

El CH<sub>4</sub> puede producirse por dos grupos de bacterias principales; las bacterias metanogénicas acetoclásticas o acetotróficas responsables de la producción de aproximadamente el 70-72% del CH<sub>4</sub> total producido a partir de CH<sub>3</sub>COOH, metanol y algunas aminas como *Methanosaeta concili* o *Methanosarcina acetivorans* y las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas o hidrogenotróficas que producen el 28-30% del CH<sub>4</sub> usando el H<sub>2</sub> producido por las bacterias acetogénicas para reducir el CO<sub>2</sub> (generación de CH<sub>4</sub> por vía reductiva de CO<sub>2</sub>) y ácido fórmico o formiato como *Metanobacterium bryantii* o *Metanobrevibacter arboriphilus* (Varnero Moreno M.T., 2011; Parra Huertas R. A., 2015).

El rango óptimo de pH para estas bacterias es de 6,7-7,3. En la práctica un biodigestor puede trabajar en un rango de pH entre 6-8 sin que la inhibición produzca problemas significativos (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

El diseño del proceso y sistema de tratamiento deberá considerar variables que favorezcan esta etapa del ciclo, es decir, que al ser bacterias de crecimiento

lento deberá seleccionarse un tiempo de retención celular adecuado que a su vez está relacionado con la temperatura ambiente donde se implemente el sistema de tratamiento. Estos valores de tiempo de retención celular se encuentran tabulados.

En el Figura1 se puede observar esquemáticamente las distintas etapas de la digestión anaeróbica donde se indican la importancia relativa de cada una de ellas expresando los porcentajes estimados tanto de degradación de materia orgánica, los aportes de productos intermedios y las contribuciones en la formación de CH<sub>4</sub> como así también los rangos de pH óptimos de cada etapa de acuerdo a lo descrito precedentemente.

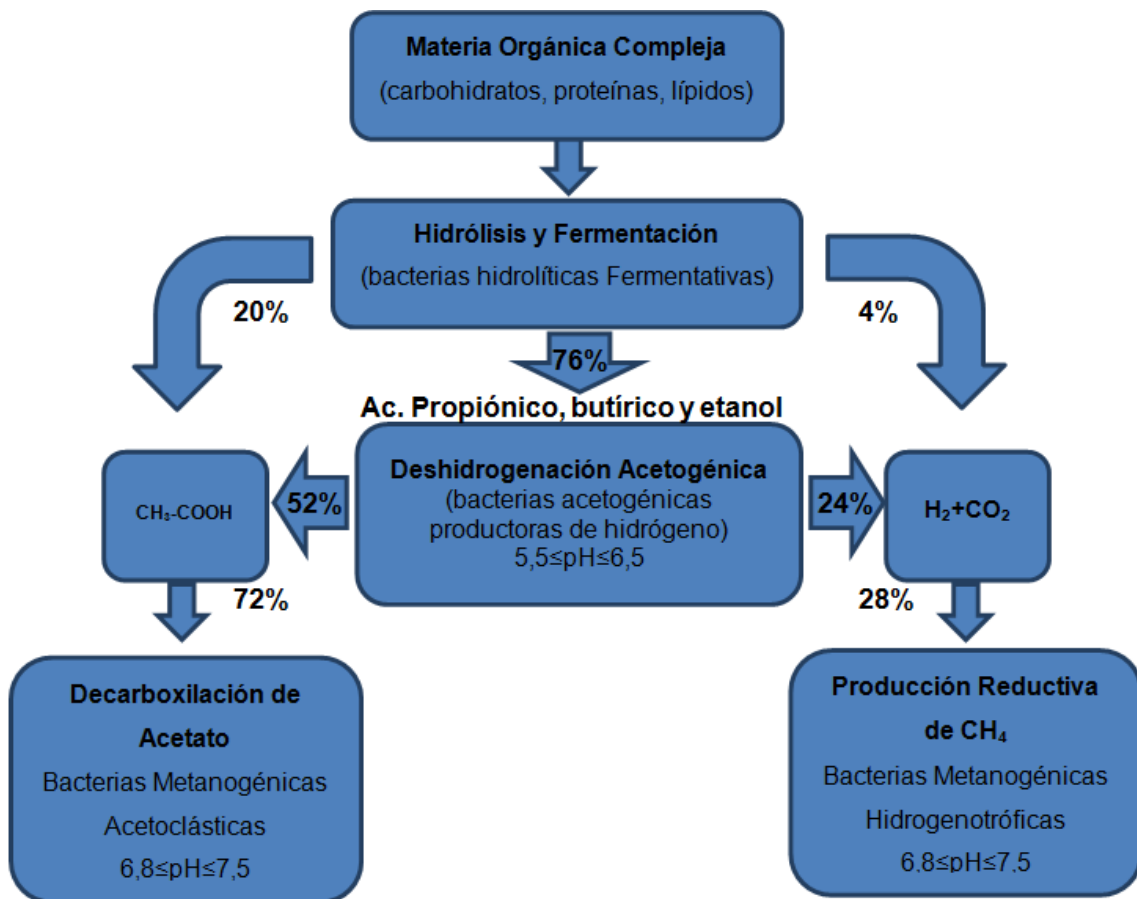


Figura 1. Etapas principales de la digestión anaeróbica (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

## FUNDAMENTOS PARA EL DESARROLLO DEL MODELO

En la digestión anaeróbica de la materia orgánica, generalmente compleja, el sustrato orgánico es transformado en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  con poca liberación de energía, la que es aprovechada por las bacterias metanogénicas para su crecimiento celular. Este crecimiento es muy lento y solamente una pequeña porción del sustrato se transforma en nuevas células. La mayor porción del sustrato orgánico se degrada para producir  $\text{CH}_4$ , constituyendo la verdadera estabilización de la materia orgánica, no así la conversión a biomasa bacteriana. El  $\text{CH}_4$  producido es insoluble y se desprende de la masa en tratamiento.

Esta característica de baja velocidad de crecimiento bacteriano constituye la etapa limitante de la estabilización de la materia orgánica por digestión anaeróbica ya que sin la existencia de las bacterias metanogénicas no podría llevarse a cabo.

Alrededor del 80 al 90% de la materia orgánica biodegradable puede ser estabilizada y convertida en  $\text{CH}_4$  bajo determinadas condiciones.

El modelado de los procesos de digestión anaeróbica se realiza a partir de la etapa metanogénica.

Las etapas de hidrólisis y fermentación no son tenidas en cuenta puesto que las velocidades de estos procesos son, en general, muchos mayores a los de la etapa metanogénica y, por lo tanto, pueden considerarse en estado estacionario desde el punto de vistas de la cinética de la fase biológica.

Bajo este concepto la cinética limitante es la de la etapa metanogénica y la producción de  $\text{CH}_4$  tiene relación directa con la biomasa de las bacterias productoras de  $\text{CH}_4$ .

Hasta que la población de bacterias metanogénicas no esté completamente establecida y en equilibrio con el resto de las bacterias intervinientes el proceso no estará completamente en operación, a menos que se haga una inoculación con lodos conteniendo las poblaciones de bacterias metanogénicas necesarias para el proceso en función a los ácidos volátiles presentes.

Si bien el modelado del proceso y el dimensionado de los equipos se hacen teniendo en cuenta la etapa limitante de las reacciones bioquímicas dentro del

biodigestor es muy importante caracterizar y controlar la alimentación al sistema, debido a que si esta está constituida por una porción importante de sustrato altamente digerible y rico en energía se favorecen las etapas más rápidas del proceso con la consecuente producción excesiva de ácidos reduciendo el pH del medio por debajo del rango óptimo para las bacterias metanogénicas inhibiéndolas y, por lo tanto, deteniendo la producción de biogás.

El balance entre las bacterias formadoras de ácidos y las bacterias metanogénicas se controla por medio de la concentración de ácidos volátiles.

El modelo considera que la fuente principal de  $\text{CH}_4$  es el  $\text{CH}_3\text{COOH}$  a partir del cual se produce la mayor transformación. El resto del  $\text{CH}_4$  se produce a partir de la reducción del  $\text{CO}_2$  por medio del  $\text{H}_2$  que se remueve de los compuestos orgánicos por medio de las enzimas (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

Las concentraciones de sustrato o materia orgánica a estabilizar se expresan por medio de la carga orgánica (DQO), mientras que para expresar la concentración de biomasa bacteriana se emplea el contenido de sólidos suspendidos volátiles (SSV) expresado en porcentaje.

El volumen de  $\text{CH}_4$  se expresará en unidades de volumen en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT).

Todas las unidades del modelo se unifican en unidades equivalentes de DQO que es la unidad adoptada por el IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Process.

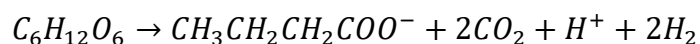
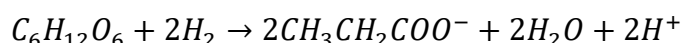


## ESTEQUIOMETRÍA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

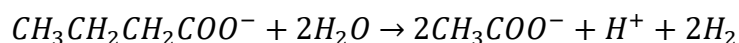
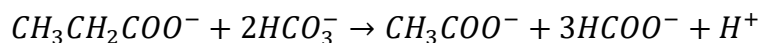
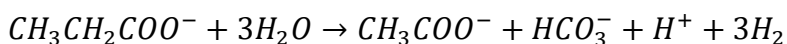
De acuerdo a lo descrito en el punto anterior, vamos a desarrollar la estequiometría de las etapas más importantes del proceso y a plantear los equivalentes en términos de DQO y volúmenes de CH<sub>4</sub> producidos en CNPT.

Para la etapa de acetogénesis, la estequiometría se plantea para la transformación de los ácidos propiónico (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH) y butírico(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH) provenientes de la acidogénesis, en ácido acético(CH<sub>3</sub>COOH).

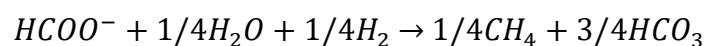
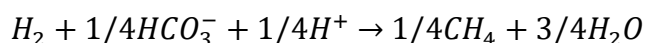
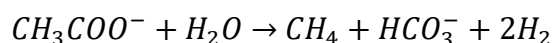
### Acidogénesis:



### Acetogénesis:

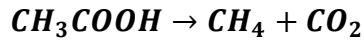


### Metanogénesis:



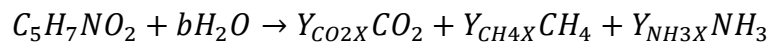
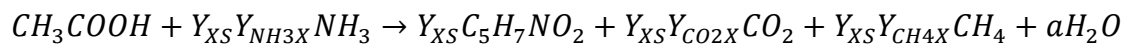
Reacciones de las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (Parra Huertas R. A., 2015).

De este conjunto de reacciones químicas se emplean para el modelado del sistema, la primera de la etapa metanogénica ya que es la más importante y pueden escribirse de forma simplificada de la siguiente manera:



Por otro lado se puede plantear la estequiometría de la conversión de  $CH_3COOH$  en biomasa con la consiguiente producción de  $CH_4$  y  $CO_2$  correspondiente a la etapa de declinación o muerte celular.

La biomasa bacteriana puede ser expresada por la forma química  $C_5H_7O_2N$  propuesta originalmente por Hoover y Porges (1952). Esta fórmula química es la que generalmente se emplea para su representación.



Donde:

$C_5H_7NO_2$ = molécula de biomasa bacteriana

$X$ =sustrato ( $CH_3COOH$ ).

$Y_{XS}$ = rendimiento biomasa respecto del sustrato. Indica cuantos moles de biomasa se forman por cada mol de sustrato digerido. Función del tipo del sistema bacteria-sustrato y de la temperatura.

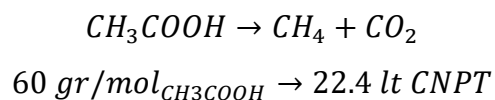
$Y_{NH_3X}$ = rendimiento amoniaco respecto a biomasa.

$Y_{CO_2X}$ = rendimiento  $CO_2$  respecto del biomasa.

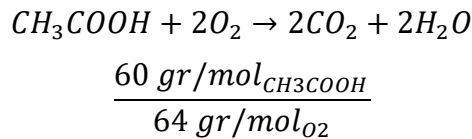
$Y_{CH_4X}$ = rendimiento de  $CH_4$  respecto del biomasa. Indica cuantos moles de  $CH_4$  se generan por cada mol de biomasa formada/destruida.

A continuación se muestran estas equivalencias en términos de DQO consideradas en el modelado del proceso partiendo de la hipótesis que todo el  $CH_4$  se forma a partir de  $CH_3COOH$  y que toda la DQO estabilizada proviene del  $CH_3COOH$ .

Generación de  $CH_4$ :



Estequiometria de la estabilización del  $\text{CH}_3\text{COOH}$  para expresar en términos de DQO:

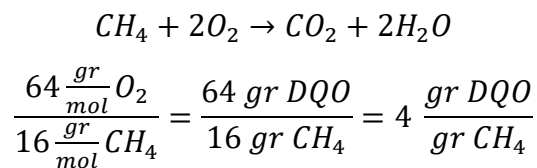


Esto es equivalente a escribir el siguiente planteo por cada mol de  $\text{CH}_4$  formado se necesitan dos moles de  $\text{O}_2$  para estabilizar el sustrato del que se produce el  $\text{CH}_4$ :

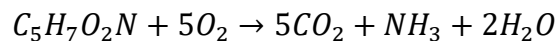
$$\frac{22.4 \text{ lt CH}_4}{64 \text{ gr DQO}} = 0.35 \frac{\text{lt CH}_4}{\text{gr DQO}} = 350 \frac{\text{lt CH}_4}{\text{Kg DQO}}$$

Por cada kg de DQO estabilizada se producen 350 lt de  $\text{CH}_4$  en CNPT. Este puede definirse como el rendimiento teórico de  $\text{CH}_4$  respecto de la DQO estabilizada.

El equivalente de  $\text{CH}_4$  en DQO se plantea a partir de la oxidación completa:



De la misma forma se puede expresar el equivalente en DQO de la biomasa bacteriana planteando la estequiometria de la oxidación completa:



$$\frac{160 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \text{O}_2}{113 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \text{biomasa}} = \frac{160 \text{ gr DQO}}{113 \text{ gr biomasa}} = 1.42 \frac{\text{gr DQO}}{\text{gr biomasa}}$$

## CINÉTICA DEL CRECIMIENTO BACTERIANO

La relación que existe entre la velocidad de crecimiento bacteriano y el consumo de sustrato se expresa por la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{dX}{dt} = Y_{XS} \frac{dS}{dt} - k_d \cdot X$$

Donde:

$dX/dt$ = velocidad neta de crecimiento bacteriano [masa SSV/(volumen x tiempo)]

$Y_{XS}$ = rendimiento biomasa/sustrato [masa de SSV/masa DQO]

$dS/dt$ = velocidad de utilización de sustrato por los microorganismos [masa DQO/volumen x tiempo]

$kd$ = constante de desaparición de bacterias o coeficiente de respiración endógeno. Tiene en cuenta la muerte bacteriana por declinación. [tiempo<sup>-1</sup>]

$X$ = concentración de bacterias expresadas como SSV. [masa SSV/volumen].

La velocidad de consumo de sustrato puede expresarse de la siguiente manera empleando una ecuación del tipo de cinética de Michaelis-Menten:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{K \cdot X \cdot S}{K_s + S}$$

Donde:

$K$ = máxima velocidad específica de utilización de sustrato [masa DQO/masa SSV.tiempo].

$K_s$ =constante de saturación. Valor de concentración de sustrato para el cual la velocidad de utilización de sustrato por unidad de masa de biomasa es la mitad de la velocidad máxima ( $K/2$ ). [masa DQO/volumen]

$S$ =concentración de sustrato en el medio (en el caso del biodigestor será la concentración en el reactor). [masa DQO/volumen].

Dividiendo miembro a miembro en  $X$  y reordenando la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{dX/dt}{X} = Y_{XS} \cdot \frac{dS/dt}{X} - kd = Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{K_s + S} - kd$$

$$\mu = \frac{dX/dt}{X} = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + S} - kd$$

Denominada ecuación de Monod, donde:

$\mu$  = velocidad específica de crecimiento de biomasa [gr SSV/gr SSV.día]

$\mu_{max}$  = máxima velocidad específica de crecimiento de biomasa.[gr SSV/grSSV.día].

S = concentración de sustrato en el reactor [gr DQO/l]

$K_s$  = constante media de saturación [gr DQO/l].

$K_d$  = coeficiente de respiración endógeno [día<sup>-1</sup>]

$$\mu_{max} = Y_{XS} \cdot K$$

Donde:

$Y_{XS}$  = rendimiento biomasa/sustrato [gr SSV/gr DQO]

$K$  = máxima velocidad específica de utilización de sustrato [grDQO/gr SSV. día]

Estas ecuaciones son aplicables a sistemas de tratamientos que utilizan bacterias como microorganismos principales y consideran la parte de residuo soluble y biodegradable (Metcalf L. y Eddy H., 1977) (Tabla 3).

Tabla 3. Constantes cinéticas empleadas en el modelo de cálculo. (Metcalf L. y Eddy H., 1977).

Sustrato	$Y_{XS}$ [grSSV/grDQO]	$K_d$ [día <sup>-1</sup> ]
Ácido graso	0,054	0,038
Hidratos de carbono	0,240	0,033
Proteínas	0,076	0,014

## FACTORES AMBIENTALES A CONTROLAR EN LA DIGESTIÓN

### ANAERÓBICA

Las bacterias metanogénicas son de crecimiento muy lento y requieren de largos periodos de tiempo para adaptarse a los cambios de carga orgánica del medio, temperatura o cualquier otra condición ambiental.

Por este motivo es deseable que el diseño y la operación de los sistemas de tratamientos se hagan en las condiciones ambientales más próximas a las óptimas a los efectos de lograr la mayor eficiencia y un rápido tratamiento.

Entre los factores más importantes podemos mencionar el tipo de sustrato, contenido y relación de nutrientes, la temperatura del medio (es uno de los factores más importantes), la carga volumétrica o carga de sólidos, el tiempo de retención hidráulico (función de la temperatura y del tipo de sustrato a tratar), pH (otro de los factores de importancia), presencia de elementos o sustancias inhibitoras, grado de mezclado, presencia de inóculos.

## **TIPO DE SUSTRATO Y CONTENIDO DE NUTRIENTES**

El crecimiento bacteriano además de requerir fuentes de carbono (C) y nitrógeno (N), también necesita de la presencia de otros elementos minerales en un cierto equilibrio como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores.

Es normal que los desechos orgánicos como los estiércoles y los lodos cloacales presenten esos elementos en condiciones adecuadas cercanas a las ideales.

### *Relación Carbono / Nitrógeno (C/N) y relación Nitrógeno/Fósforo (N/P):*

El carbono se emplea como fuente de energía y el nitrógeno como elemento para la formación de nuevas células. El consumo de carbono es 30 veces superior al de nitrógeno.

En general es aceptable una relación C/N de 20-30:1 (Guevara Vera A., 1996). En cambio, se requiere una relación nitrógeno y fósforo (N/P) de 5.

## Temperatura

La temperatura de operación del digestor es considerada uno de los principales parámetros de diseño debido a su gran influencia en la velocidad de digestión anaeróbica.

El proceso se lleva a cabo con buena eficiencia en dos rangos de temperatura bien definidos, 10°C a 37°C para la población de bacterias mesofílicas y entre 55°C a 60°C para la población termofílica.

El proceso mesofílico es más estable y más adecuado de emplear en medio rural con digestores de pequeño volumen.

Las temperaturas de trabajo mencionadas deben lograrse desde el exterior ya sea por la temperatura ambiente o por adición de una fuente auxiliar de calor.

En general los digestores rurales trabajan a una temperatura similar a la ambiental. Esto puede mejorarse si se implementa un sistema de calefacción solar pasiva, empleando colores oscuros en el material con el que está construido el digestor, aislar paredes y suelo o construir una cobertura tipo invernadero que a la vez funciona de protección en el caso de los digestores construidos con materiales relativamente frágiles.

La solubilidad de los gases producidos desciende al aumentar la temperatura. Esto es positivo para gases como el  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{H}_2$  dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos.

La solubilidad de las sales también aumenta con el incremento de temperatura haciendo que los nutrientes estén más accesibles para la biomasa bacteriana lo que mejora la velocidad del proceso. Por otra parte se genera un efecto negativo de los compuestos tóxicos que al aumentar su solubilidad perjudican el proceso.

La viscosidad del medio disminuye con el incremento de temperatura lo que reduce las necesidades de agitación (Varnero Moreno M.T., 2011).

## Tiempo de retención

La temperatura está directamente relacionada con el tiempo que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para lograr un adecuado nivel de degradación. A medida que aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención.

En este punto deben discriminarse dos tiempos de retención asociados a los procesos. El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y el Tiempo de Retención Celular (TRC). El TRC depende de la velocidad de crecimiento de la población bacteriana. Es el tiempo medio que la biomasa bacteriana permanece dentro del reactor.

El TRH es un concepto que encuentra su mayor aplicación para reactores del tipo continuo. Es el tiempo medio que tarda en renovarse el volumen contenido dentro del reactor y matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$TRH = \frac{\text{Volumen hidráulico de reactor}}{\text{Caudal volumétrico de alimentación al reactor}} = \frac{V_H}{Q}$$

Existe un cierto valor mínimo de TRC por debajo del cual la estabilización del residuo no se produce y se denomina Tiempo Medio Mínimo de Retención Celular (TRC<sub>m</sub>) y representa el tiempo de retención en el cuál las células se destruyen o son eliminadas del sistema a una velocidad que no les permite su incremento como biomasa. En este punto la concentración de sustrato que entra (S<sub>0</sub>) y sale (S) del reactor son iguales (Metcalf L. y Eddy H. 1977).

Los sistemas de tratamiento biológico no deben proyectarse a TRC=TRC<sub>m</sub>. Las relaciones que se emplean normalmente para el diseño son:

$$2. TRC_m \leq TRC \leq 20. TRC_m$$



Para el caso particular de un biodigestor que trabaja con régimen continuo y mezcla completa el TRC=TRH. Ambos tiempos se encuentran descritos en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempos medios de retención celular sugeridos para utilizar en el diseño de digestores de mezcla completa (Metcalf L. y Eddy H., 1977).

Temperatura de funcionamiento [°C]	TRC <sub>m</sub> [días]	TRH [días]
18	11	28
24	8	20
29	6	14
35	4	10
40	4	10

Por otro lado sabemos que el TRC y el TRH están ligados al tipo de sustrato y a la temperatura. En la Tabla 5 se puede observar el TRH para algunos tipos de estiércoles en el rango de operación mesofílico:

Tabla 5. Tiempo de retención Hidráulico para algunos tipos de estiércoles para el rango mesofílico. (Hilbert J.A., 2011).

Sustrato	TRH [días]
Estiércol vacuno líquido	20-30
Estiércol porcino líquido	15-25
Estiércol aviar líquido	20-40

## pH

Esta es una de las variables ambientales más importantes a controlar debido a que las bacterias metanogénicas son más sensibles a las variaciones de pH que el resto de los microorganismos de la biomasa bacteriana.

El pH se utiliza como parámetro para evaluar la correcta operación del sistema.

La digestión anaeróbica se realiza adecuadamente en un rango de pH de 6.6 a 7.6 con un rango óptimo cercano a la neutralidad en los valores de 7.0 a 7.2. Fuera de esos límites el proceso puede producirse pero con una menor eficiencia (Figura 2).

En el rango de pH entre 6.0 y 8.0 el control de pH del proceso está regido por el sistema químico dióxido de carbono-bicarbonato, que está relacionado con el pH por medio de la siguiente ecuación:

$$[H^+] = K_i \frac{[H_2CO_3]}{[HCO_3^-]}$$

La concentración de ácido carbónico  $[H_2CO_3]$  está relacionada con el porcentaje de dióxido de carbono en el digestor.  $K_i$  es la constante de ionización para el ácido carbónico. La concentración de ion bicarbonato  $[HCO_3^-]$  forma parte de la alcalinidad total del sistema.

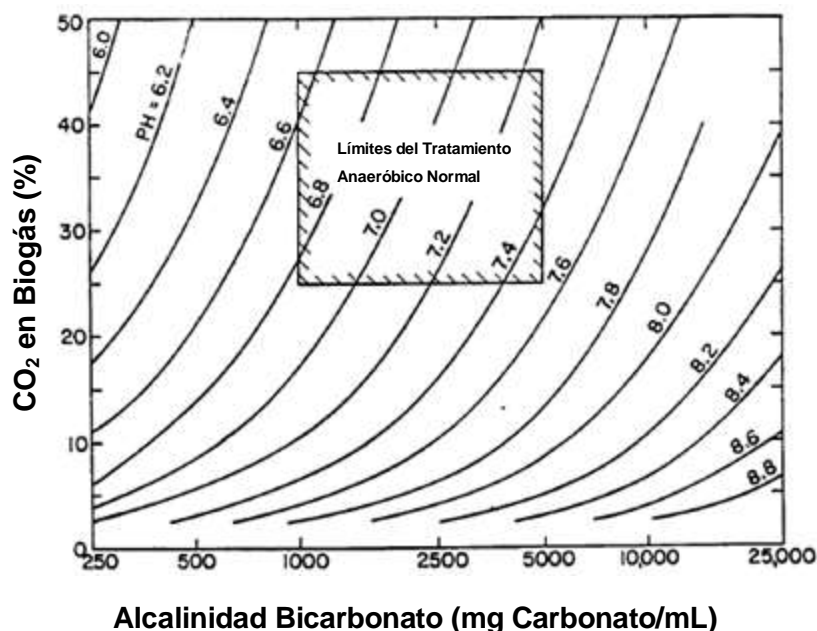


Figura 2. Relación entre el pH y la concentración de ion bicarbonato a temperatura de 35°C (McCarty. Citado por Varnero Moreno M.T., 2011).

## **Carga de sólidos**

La movilidad de las bacterias dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la producción de gas.

El contenido de sólidos totales (ST) es una de las principales variables a tener en cuenta. Indica el porcentaje de materia seca contenida en el estiércol. Estos ST están formados por sólidos orgánicos e inertes.

En el caso de los estiércoles de cerdo o vaca los sólidos inertes pueden ser arena del piso del corral que se ha mezclado con el estiércol durante el lavado de los pisos.

De forma general para los estiércoles se tiene que de los sólidos totales, entre un 15% y un 25% corresponde a sólidos inertes. El resto corresponde a la porción orgánica denominada sólidos volátiles (SV) (Marti Herrero J., 2019).

Experimentalmente se ha determinado que para mezclas de estiércoles de animales en agua el porcentaje óptimo de sólidos totales oscila entre 8% y 10% trabajando con digestores continuos y semicontinuos (Hilbert J.A., 2011).

Un aspecto importante a considerar es que el contenido de ST y SV del estiércol según sale del animal sufrirá modificaciones en su concentración durante las operaciones de recolección por el agregado de agua de limpieza de los corrales y la incorporación de sólidos inertes como arena o tierra. Esto reduce los % de ST y SV. Este es un factor muy importante a tener en cuenta cuando se trabaja con cerdos, puesto que el método de recolección puede realizarse en seco mediante palas o por arrastre de grandes cantidades de agua.

Una vez que los estiércoles han sido recolectados es necesario determinar con qué cantidad de agua deben ser mezclados para que la alimentación al biodigestor sea la adecuada para un correcto funcionamiento.

En los biodigestores tubulares se trata de conseguir que los sólidos totales (ST) se encuentren en el rango deseable del 3% al 5%. El biodigestor puede

alimentarse con cargas de ST menores al rango indicado pero no es recomendable con valores mayores (Marti Herrero J., 2019).

Normalmente se debe mezclar el estiércol con agua para lograr los porcentajes antes mencionados de ST en la alimentación.

De acuerdo al origen del estiércol existen tabuladas las cantidades de agua a emplear en la mezcla.

### **Presencia de sustancias tóxicas e inhibidores**

El proceso de digestión anaeróbica puede ser inhibido por sustancias presentes en el desecho a digerir o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de la biomasa bacteriana que en determinadas condiciones presentan toxicidad.

Entre las sustancias que pueden acompañar al sustrato orgánico a digerir podemos mencionar al amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), compuestos halogenados, cianuro y fenoles.

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes pueden inhibir y hasta incluso interrumpir el proceso fermentativo si se encuentran dentro de determinadas concentraciones.

Algunos de los subproductos de la actividad metabólica son el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  y ácidos grasos volátiles (AGV).

Cuando la concentración de AGV es demasiado alta el proceso de digestión anaeróbica puede inhibirse (valores superiores a 2000 ppm para la fermentación mesofílica y superiores a 3600 ppm para la fermentación termofílica) (Hilbert J.A., 2011).

#### *Ácidos Grasos Volátiles (AGV):*

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son los productos intermedios mayoritarios del proceso de digestión anaeróbica siendo los precursores de la metanogénesis.

Durante la degradación anaeróbica, la materia orgánica compleja es hidrolizada y fermentada en compuestos de bajo peso molecular incluyendo ácidos grasos de cadena corta como acético, propiónico y butírico, y en menores cantidades ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico.

Su concentración es una de las variables que más eficazmente puede indicar la evolución o estado del proceso. Esta concentración normalmente se expresa como mg de ácido acético por litro.

En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV es relativamente baja y se encuentra en el orden de 50-250 mgCH<sub>3</sub>COOH/litro.

Un incremento en la concentración de AGV en el sistema indica una desestabilización del proceso y en consecuencia una disminución de la producción de biogás. Este incremento se manifiesta con una reducción del pH.

Una cantidad excesiva de AGV puede ser provocada por una carga orgánica muy elevada, por una caída en la temperatura o por la acumulación de mucha espuma dentro del biodigestor (Acosta L. y Obaya Abreu M., 2005).

#### *Nitrógeno Amoniacal:*

El amoníaco puede estar presente en las materias primas que entran al biodigestor o ser producidos durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas y aminoácidos. Durante el proceso anaeróbico, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales.

El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y del amoníaco. Ambas especies se encuentran en equilibrio químico y sus concentraciones relativas dependen del pH.

De las dos especies químicas, la que puede inhibir el proceso es el amoníaco libre. El efecto inhibitorio del amonio se presenta a pH alcalino.

Además de pH, la cantidad de amoníaco libre es función de la concentración del sustrato, de la relación carbono/nitrógeno (C/N), de la capacidad buffer de medio y de la temperatura de digestión.

Si bien el amonio es un nutriente importante, una concentración excesiva puede resultar inhibitoria del proceso como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Efectos de la concentración de nitrógeno amoniacal en el tratamiento anaeróbico. (Varnero Moreno M.T., 2011).

<b>Concentración de nitrógeno amoniacal [mg/lit]</b>	<b>Efecto en el tratamiento anaeróbico</b>
<b>50-200</b>	Beneficioso
<b>200-1000</b>	Sin efectos adversos
<b>1000-3000</b>	Inhibitorio a valores de pH elevado
<b>&gt;3000</b>	Tóxico

*Sulfatos y sulfuros:*

La metanogénesis puede resultar inhibida por la presencia de elevadas concentraciones de sulfatos en el sustrato orgánico a digerir.

El sulfuro se produce durante la degradación de materia orgánica que contiene proteínas como por ejemplo el estiércol de cerdo.

El sulfuro comienza a ser tóxico para las bacterias metanogénicas a partir de una concentración de 50 mg/lit.

La forma no ionizada presenta mayor toxicidad por lo que es de esperarse que un pH bajo y una baja temperatura favorezcan la inhibición.

*Cationes y metales pesados:*

Los cationes de metales alcalino y alcalino térreos tienen efecto estimulador de la actividad bacteriana cuando se encuentran en bajas concentraciones.

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo tanto, los metales pesados provocan toxicidad a baja concentración (Tablas 7 y 8).

El orden de toxicidad de metales pesados es la siguiente:

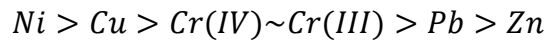


Tabla 7. Efecto de la concentración de cationes alcalinos y alcalino-térreos [mg/lit]. (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012).

Catión	Estimulante	Moderada inhibición	Fuerte inhibición
Sodio (Na <sup>+</sup> )	100-200	3500-5500	8000
Potasio (K <sup>+</sup> )	200-400	2500-4500	12000
Calcio (Ca <sup>++</sup> )	100-200	2500-4500	8000
Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	75-150	1000-1500	3000

Tabla 8. Resumen de elementos inhibidores del proceso anaeróbico y sus concentraciones correspondientes (Guevara Vera A., 1996).

Elementos	Concentración inhibidora
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (según contenido de nitrógeno)	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/lit
Cr	200 mg/lit
Ni	200-500 mg/lit
CN <sup>-</sup>	25 mg/lit
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/lit
Na <sup>+</sup>	3500-5500 mg/lit
K <sup>+</sup>	2500-4500 mg/lit
Ca <sup>++</sup>	2500-450 mg/lit
Mg <sup>++</sup>	1000-1500 mg/lit

## **Potencial Redox**

El valor del potencial Redox para una óptima actividad de las bacterias metanogénicas debe estar entre -110mV y -350mV a pH 7,0 para asegurar un ambiente fuertemente reductor (Varnero Moreno M.T., 2011).

## **Agitación y mezclado**

La agitación es muy importante para lograr la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, uniformar la concentración de sustrato dentro del biodigestor y mezclarlo con la biomasa para lograr un contacto íntimo y facilitar su digestión, evitar la formación de costras, uniformar la distribución de biomasa bacteriana dentro del reactor para evitar volúmenes muertos y prevenir la formación de espumas y sedimentación.

El resultado de la agitación se traduce en un incremento en la producción de biogás y en la reducción del TRH debido a las siguientes razones:

- Distribución uniforme de sustrato y temperatura en el interior del reactor.
- Distribución uniforme de productos intermedios y finales.
- Contacto íntimo entre las bacterias y el sustrato mejorando la disponibilidad del mismo.
- Minimizar la acumulación de lodos y de espuma que dificulta la liberación del biogás producido.

La agitación y el mezclado pueden realizarse en forma mecánica, hidráulica o por burbujeo mediante la recirculación del biogás producido. Puede realizarse en forma continua o intermitente.



## **Inóculos**

El uso de inóculos se realiza para reducir el tiempo de arranque del reactor o digestor, llevando la biomasa bacteriana a la fase estacionaria con lo cual se incrementa la velocidad de producción de biogás.

La inoculación puede realizarse con lodos provenientes de otro biodigestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad.

De esta forma puede lograrse en forma rápida la estabilización del funcionamiento del biodigestor. Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un biodigestor son: 1) la proporción en que se agrega el inóculo; 2) la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad del inóculo, mayor será la eficacia.

En el caso de arranque de un biodigestor resulta razonable emplear 1/3 del volumen hidráulico con un inóculo que presente una buena actividad metanogénica (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012).

Los estiércoles de equinos, vacunos y porcinos contienen flora anaeróbica en abundancia, por lo tanto, generalmente no es necesario el uso de inóculos. La cuestión inicial consiste en balancear las condiciones ambientales en cuanto a contenido de agua, pH, temperatura y las relaciones C/N (Carbono/Nitrógeno) y N/P (Nitrógeno/Fósforo).

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS SUSTRATOS PARA DIGESTIÓN**

### **ANAERÓBICA:**

En términos generales todo sustrato orgánico que presente materia orgánica volátil puede ser tratado biológicamente por bacterias metanogénicas para generar biogás.

Como se describió anteriormente, el crecimiento bacteriano además de requerir fuentes de carbono (C) y nitrógeno (N), también necesita de la presencia de otros elementos minerales en un cierto equilibrio como azufre, fósforo,

potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores.

Normalmente los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. En los estiércoles animales tanto los contenidos de nutrientes como su degradabilidad, rendimiento de producción y composición de Biogás dependerá del tipo de animal y de la alimentación que reciben (Hilbert J.A., 2011).

El potencial de generación de Biogás y el tipo de tratamiento o proceso a emplear dependen del origen, la composición, características físico químicas y condiciones ambientales del sustrato a tratar.

Como la degradación de la materia orgánica es compleja, podemos simplificar la situación diciendo que las fuentes carbonadas más empleadas por la biomasa bacteriana son los ácidos grasos, los hidratos de carbono y las proteínas.

Tabla 9, Producción de estiércol de distintas especies animales y la producción de biogás referida a los sólidos volátiles. (Hilbert J.A., 2011).

<b>Especie</b>	<b>Peso Vivo</b>	<b>Estiércol [Kg/día]</b>	<b>Biogás [lt/kg SV]</b>	<b>CH<sub>4</sub> [%]</b>
<b>Cerdos</b>	<b>50</b>	<b>4,5-6</b>	<b>340-550</b>	<b>65-70</b>
<b>Vacunos</b>	400	25-40	90-310	65
<b>Equinos</b>	150	12-16	200-300	65
<b>Ovinos</b>	45	2,5	90-310	63
<b>Aves</b>	1.5	0,06	310-620	60
<b>Caprinos</b>	40	1,5	110-290	.....

Los valores de la Tabla 9 son indicativos y representan rangos tanto de producción de estiércol como de producción de biogás y contenido porcentual de CH<sub>4</sub>.

La cantidad de biogás producida y su contenido de CH<sub>4</sub> están relacionados con su composición en ácidos grasos, carbohidratos, proteínas, que a su vez

también determina los contenidos de carbono (C), nitrógeno (N) y su relación C/N (Tablas 10 y 11).

Tabla 10, Relación Carbono/ Nitrógeno de diversos sustratos orgánicos. (Gropelli E., Giampaoli O., 2012)

Material	% Nitrógeno (base seca)	% de Carbono (base seca)	Relación C/N
Estiércol bovino	1,70	30,6	18:1
Estiércol equino	2,30	57,6	25:1
Estiércol ovino	3,80	83,6	22:1
Estiércol porcino	<b>3,80</b>	<b>76,0</b>	<b>20:1</b>
Estiércol aviar	6,30	50,0	8:1
Hojas secas	1,00	41,0	41:1
Pajas de arroz	0,63	42,0	67:1
Paja de trigo	0,53	46,0	87:1
Rastrojo de maíz	0,75	40,0	53:1
Rastrojo de soja	1,30	41,0	32:1
Sorgo granífero	1,63	31,8	19:1

Tabla 11, Porcentaje promedio de ST en diferentes residuos animales (Varnero Moreno M.T., 2011).

Residuos animales	Sólidos Totales (%)
Bovinos	13,4-56,2
Porcinos	<b>15,0-49,0</b>
Aviar	26,0-92,0
Caprinos	83,0-92,0
Ovinos	32,0-45,0
Conejos	34,7-90,8
Equinos	19,0-42,9
Humanos	17

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PORCINOS**

Los residuos animales de las explotaciones ganaderas están constituidos por una parte seca, formada por el estiércol de los animales y restos de alimentos, y otra líquida formada por orina, remanentes de agua de los bebederos, agua de lavado de la explotación y, pueden contener agua de lluvia si el sistema de recolección no está cubierto. En el caso de las explotaciones porcinas esta mezcla se denomina purín.

El purín es un material no estéril, generalmente básico y bastante salino. Posee cantidades importantes de hidratos de carbono, lípidos, aminoácidos, proteínas, urea y compuestos azufrados, como así también elevados contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na). También contiene micronutrientes como hierro (Fe), cinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn) (Tabla 12).

Variables como la concentración de elementos que lo constituye y el volumen de generación diario, dependen de factores como: la raza, el estado fisiológico, el tipo de alimentación y el tipo de almacenamiento, la cantidad de agua utilizada en la limpieza, los productos utilizados en la desinfección y la época del año (INTA, 2012).

Tabla 12, Concentración media de los principales parámetros de los purines de cerdo (INTA, BPP, 2012).

<b>Parámetro</b>	<b>Concentración</b>
<b>Materia seca</b>	5-7%
<b>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	15000-25000 mg/lt
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	35000-60000 mg/lt
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	3000-5000 mg/lt
<b>Sodio (Na)</b>	1000-2000 mg/lt
<b>Fósforo (P)</b>	1000-3000 mg/lt
<b>Potasio (K)</b>	1000-3000 mg/lt
<b>Cobre (Cu)</b>	20-40 mg/lt
<b>Zinc (Zn)</b>	20-40 mg/lt
<b>Hierro (Fe)</b>	50-150 mg/lt

En el caso de producción porcina de ciclo completo en sistemas confinados la generación de deyecciones depende de la etapa fisiológica del animal (Tabla 13). En nuestro país este tipo de sistemas abarca el 60% de la producción porcina del país y engloba al 40% de las madres existentes.

Es importante contabilizar las cantidades de excretas generadas en todo el sistema de producción animal para poder realizar una estimación de los volúmenes a tratar para poder dimensionar en forma correcta el sistema de tratamiento, como así también el potencial de generación de biogás. El máximo beneficio en la digestión anaeróbica de purines se logra cuando son los más frescos posibles.

Tabla 13. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica (INTA, BPP, 2012).

<b>Etapa reproductiva</b>	<b>Peso vivo [Kg]</b>	<b>Volumen [lt/día]</b>	<b>Promedio [lt/día]</b>	<b>Materia sólida [%]</b>
<b>Lechones hasta 3 semanas</b>	5		1,0	10
<b>Lechones destetados</b>	12	1,5-2,5	2,0	10
<b>Cerdos de engorde con alimento solo</b>	50	2,0-5,5	4,0	10
<b>Cerdos de engorde con agua:alimento (2.5:1)</b>	50	2,0-5,0	4,0	10
<b>Cerdos de engorde con agua:alimento (4:1)</b>	50	4,0-9,0	7,0	6.0
<b>Cerdos engordados con subproductos alimenticios</b>	50	Variable	15,0	10
<b>Cerdos engordados con suero</b>	50	14,0-17,0	14,0	2
<b>Verraco</b>	200		5,0	10
<b>Cerda destetada (seca)</b>	150		4,5	10
<b>Cerda con camada de 3 semanas</b>	150		15,0	10

## **EL BIOGAS**

El Biogás es una mezcla de gases obtenidos a partir de la digestión anaeróbica de sustratos o desechos orgánicos biodegradables. Sus principales componentes son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y en menor proporción sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>), Nitrógeno (N<sub>2</sub>), Hidrógeno (H<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) que se producen durante la fermentación anaeróbica. La proporción de cada uno de estos componentes es función del origen y la composición del sustrato orgánico (Tabla 14).

Tabla 14. Componentes del biogás en función del sustrato empleado. (Acosta L., Abreu C., 2005).

<b>Componente</b>	<b>Residuos agrícolas</b>	<b>Lodos de depuradora</b>	<b>Residuos industriales</b>	<b>Gas de vertedero</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
<b>CO<sub>2</sub></b>	20-50%	20-50%	30-50%	34-55%
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
<b>H<sub>2</sub></b>	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
<b>H<sub>2</sub>S</b>	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
<b>NH<sub>4</sub></b>	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
<b>CO</b>	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
<b>N<sub>2</sub></b>	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
<b>O<sub>2</sub></b>	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
<b>Compuestos orgánicos</b>	trazas	trazas	trazas	5 ppm (terpenos, esterés)

Esta mezcla gaseosa es combustible y presenta un poder calorífico inferior que oscila entre los 5000 y 5500 Kcal/m<sup>3</sup> teniendo en cuenta que las proporciones de metano son variables (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

El aprovechamiento del biogás produce un ahorro energético por sustitución de otros combustibles de fuentes no renovables y un impacto positivo sobre el medio ambiente debido al control de las emisiones líquidas y gaseosas de la gestión de residuos orgánicos. Recordemos que el potencial de calentamiento del CH<sub>4</sub> es 21 veces superior al CO<sub>2</sub> (empleado como referencia y al cuál se le asigna por convención el valor 1).

En las Tablas 15 y 16 se muestran las comparaciones del Biogás con otros combustibles convencionales ya sea para sustitución o para manipuleo.

Tabla 15. Equivalencia del biogás de 5500 Kcal/m<sup>3</sup> con otros combustibles.  
(Gropelli E. y Giampaoli O., 2012).

Combustible	Poder calorífico inferior	Equivalencia biogás de 5500 Kcal/m <sup>3</sup>
Gas natural	9300 Kcal/m <sup>3</sup>	1,7
Gas envasado grado 1	12013 Kcal/Kg	2,18
Gas envasado grado 3	11878 Kcal/Kg	2,16
Leña blanda	1840 Kcal/Kg	0,33
Leña dura	2300 Kcal/Kg	0,42
Nafta	8232 Kcal/lt	1,50
Kerosene	8945 Kcal/lt	1,63
Gas-oil	9211 Kcal/lt	1,67
Fuel-oil	12013 Kcal/Kg	1,87

Tabla 16, Energía equivalente del biogás (65% CH<sub>4</sub> y 35% CO<sub>2</sub>) vs otros combustibles gaseosos (Varnero Moreno M.T., 2011).

Variable	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Metano	Hidrógeno
PCI [Kwh/m <sup>3</sup> ]	7,0	10	26	10	3
Densidad [Tn/m <sup>3</sup> ]	1,08	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidad relativa al aire	0,81	0,54	1,51	0,55	0,07
Límite de explosividad (% gas en aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura encendido [°C]	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido [m/s]	0,31	0,39	0,42	0,47	0,43
Requerimiento teórico de aire [m <sup>3</sup> /M <sup>3</sup> ]	6,6	9,5	23,9	9,5	2,4



## **ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS**

Debido a que el biogás es una mezcla gaseosa, existen componentes de la misma que deben eliminarse en mayor o menor medida dependiendo de la utilización que se dará al biogás.

Esta purificación o acondicionamiento es importante por dos razones:

- Incrementar el poder calorífico del biogás.
- Adecuarlo a requerimientos de algunas aplicaciones, como uso en motores, calderas, celdas de combustible, etc.

## **REMOCIÓN DE CO<sub>2</sub>:**

La remoción de CO<sub>2</sub> se realiza para enriquecer el contenido de CH<sub>4</sub> en la mezcla gaseosa. La mayoría de las aplicaciones comunes del biogás (motores de combustión interna de generadores eléctricos, calentadores, quemadores, etc.) no requieren la remoción del CO<sub>2</sub> presente en la mezcla gaseosa.

En el caso de motores sofisticados que requieren combustibles el CO<sub>2</sub> debe ser removido obteniéndose un combustible de calidad similar al gas natural.

El CO<sub>2</sub> puede removerse del biogás mediante operaciones de absorción, adsorción, separación por membranas y criogénesis (Varnero Moreno M.T., 2011).

## **REMOCIÓN DE AGUA**

Generalmente el biogás está saturado de agua a la salida del digestor. Es recomendable que su humedad relativa sea inferior al 60% para prevenir la formación de condensados en las cañerías y equipos. Un método práctico para eliminar la humedad presente en la mezcla gaseosa es montar las líneas de conducción con pendiente hacia puntos de acumulación y purga para eliminar los condensados que se producen en el interior de las cañerías por enfriamientos con los cambios de temperaturas ambientales. Un punto práctico de eliminación

de condensado es la válvula de alivio o seguridad que debe colocarse a la salida de los biodigestores como se explicará más adelante.

La cañería de salida de biogás del biodigestor deberá instalarse con pendiente negativa hacia la válvula para permitir el drenaje del condensado con posterior rebalse del mismo por los orificios de nivel que mantienen la presión de columna de la válvula.

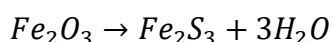
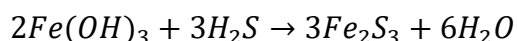
Otros métodos de eliminación de humedad del biogás son el secado por compresión y/ enfriamiento del gas, adsorción de humedad por carbón activado o sílica gel o por medio de absorción en solución de glicol o sales higroscópicas (Varnero Moreno M.T., 2011).

## REMOCIÓN DEL H<sub>2</sub>S

Es muy importante la remoción del H<sub>2</sub>S debido a que por combinación con el agua puede producir H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> corrosivo para motores y cañerías. Además, a concentraciones de 100ppm en volumen es tóxico.

El carbón activado puede usarse para remover tanto el CO<sub>2</sub> como también el H<sub>2</sub>S. En este último caso actúa como catalizador convirtiendo el azufre del H<sub>2</sub>S en azufre elemental (S).

Puede removerse por absorción en compuestos de hierro. En este procedimiento el H<sub>2</sub>S es absorbido por el hidróxido de hierro (III) y/o óxido de hierro (III) produciendo una desulfuración seca.



En la práctica la remoción de H<sub>2</sub>S se realiza por medio de viruta de hierro la cual se expone por 24hs a una solución de vinagre para producir la capa superficial de óxido férrico, luego se introduce en un recipiente por dónde se hace circular el Biogás.

## **REMOCIÓN DEL AMONÍACO.**

El amoníaco se forma a valores de pH altos a partir del amonio que se forma en ciertos desechos como el guano de aves. Una de las formas más comunes de eliminar el amoníaco es haciendo pasar la mezcla por una solución ácida lográndose la solubilización como sal de amonio.

## **USOS DEL BIOGÁS:**

Todos los artefactos de uso doméstico corriente que funcionen a gas natural o envasado pueden ser convertidos a biogás adaptando las boquillas de los quemadores. El biogás requiere de una mayor presión de aire, lo que puede lograrse incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la del metano puro) (Varnero Moreno M.T., 2011) (Figura 3).

La presión adecuada para un óptimo uso del biogás oscila entre los 7 y 20 mbar, variable a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de los equipos de quema.

## **GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

La generación de energía eléctrica puede realizarse a partir de un motor de ciclo Otto acoplado a un generador eléctrico.

El motor debe estar adaptado para que funcione con biogás sustituyendo el sistema de carburación y con un adelanto de encendido para compensar la menor velocidad del frente de llama, logrando una mejor eficiencia.

El octanaje aproximado del biogás es de 120 que comparándolo con las naftas de uso común que tienen un número de octano de 95 a 97 nos permite su sustitución.

Se debe hacer la salvedad que el motor entregará menos potencia con biogás que con nafta debido al contenido de CO<sub>2</sub> que ronda el 40% en el biogás.

El rendimiento de conversión de biogás en energía motriz es de 0.50 m<sup>3</sup>/Hp. hora aproximadamente (Gropelli E. y Giampaoli O., 2012)

	Lámparas a biogás	Consumo biogás: 0,07 m <sup>3</sup> /hr
	Cocina a biogás de dos hornillas	Consumo biogás: 0,20 - 0,42m <sup>3</sup> /hr
	Olla arrocera	Consumo biogás: 0,14m <sup>3</sup> /hr
	Generador eléctrico (600W)	Consumo de biogás: 0,7 -0,8 m <sup>3</sup> /kWh
	Calentador de agua	Consumo de biogás: 2,2 m <sup>3</sup> /hr Presión ingreso del agua: 0,025 - 0,8MPa Presión de gas requerida: 1,6KPa



Figura 3. Principales equipos para biogás y sus respectivos consumos. (Varnero Moreno M.T., 2011) y equivalente energético del biogás (Hilbert J.A., 2011)

## **HIPOTESIS**

Los desechos generados en los emprendimientos de cría porcina de ciclo completo en feedlot denominados purines, pueden ser captados y digeridos anaeróbicamente para generar biogás para reemplazar al menos parcialmente, en el propio establecimiento, el consumo energético proveniente de fuentes no renovables generando beneficios energéticos, económicos y menores impactos ambientales.

A su vez el biol o digestato producido puede permitir reducir el uso de fertilizantes sintéticos reduciendo los impactos ambientales relacionados a estos últimos.

## OBJETIVOS

### – General

El objetivo principal de esta tesis fue el diseño de un biodigestor tubular flexible para la generación de biogás, minimizar el impacto ambiental y reemplazar el consumo de energías provenientes de combustibles fósiles en una granja de cerdos con sistema de crianza con ciclo completo.

### – Específicos:

- Evaluar las características fisicoquímicas de purines de cerdo y estimar las cantidades generadas y disponibles para la producción de biogás.
- Diseñar el diagrama de flujo del proceso de tratamiento propuesto (ubicaciones de biodigestores, entradas y salidas para disposición final de efluentes y puntos de captación de gas).
- Diseñar y dimensionar el biodigestor con recomendaciones de instalación y montaje.
- Proponer un modelo de balances de materia y energía para el sistema, con estimaciones de las cantidades de biogás producidos y sus equivalentes energéticos.
- Realizar una comparativa del impacto ambiental del sistema de producción porcina con y sin sistema de biodigestión.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Relevamiento de la empresa donde se realizó el estudio

Para el desarrollo del proyecto se trabajó con una granja de cerdos de ciclo completo, por lo que fue necesario realizar un relevamiento del proceso integral que se lleva a cabo en la misma. Para lo cual se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Localización de la granja
- Clima teniendo en cuenta la clasificación de W. Köppen-Geiser.
- Tipo de explotación porcina - Etapas del ciclo productivo
- Alimentación de animales
- Disposición de excretas

### Evaluar las características fisicoquímicas de purines de cerdo y estimar las cantidades generadas y disponibles para la producción de biogás

Para el cálculo de excretas diarias se empleó el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) de INTA (2012). Los valores de volúmenes de desechos producidos corresponden a la sumatoria:

$$vol. \text{ purín prod. } \left[ \frac{lt}{día} \right] = heces + orina + agua \text{ de bebida} + agua \text{ de limpieza}$$

Se realizó la caracterización de los purines generados en el establecimiento. Para ello se decidió realizar los muestreos en el canal a la salida de los corrales y en el sitio previo a la entrada en las lagunas de acumulación.

Se tomaron muestras por duplicado de purín de dos litros cada una y se mantuvieron refrigeradas hasta el momento de los ensayos en el laboratorio. Los recipientes usados para el muestreo fueron botellas vacías de agua mineral.

Al momento del muestreo se midió la temperatura de las muestras empleando un termómetro capilar de mercurio con escala de -10°C a 60°C.

Las muestras de purín fueron analizadas en el laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres empleando protocolos oficiales correspondientes descritos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23<sup>ed</sup> (Baird , 2017). Los parámetros analizados fueron: pH, DQO, Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) y Sólidos Suspendidos Volátiles(SSV). La actividad metanogénica específica (AME) se determinó con el método descrito por Field J. (1987), y se en [gDQOCH<sub>4</sub>/gSSV.d] (gramos de materia orgánica transformada en CH<sub>4</sub> expresadas como DQO por cada gramo de Sólidos Suspendidos Volátiles por día.

En función a los resultados se determinó la necesidad de realizar alguna adecuación del residuo para su tratamiento en el proceso. Por otra parte, se realizó la caracterización de los lodos anaeróbicos de fondo de laguna para evaluar su aptitud como inóculo para el arranque del sistema empleando la misma metodología analítica indicada anteriormente.

En función de la cantidad de animales existentes, su etapa fisiológica y las cantidades promedio de producción de purín se calcularon estimativamente la cantidad de desechos a tratar.

### **Diseño del proceso de tratamiento propuesto**

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se realizó el diseño del proceso de tratamiento para la disposición final de los efluentes. Los aspectos que se tuvieron en cuenta fueron:

- Selección de tecnología de tratamiento de efluentes
- Ubicación de los sistemas dentro del predio de la empresa y en el proceso
- Material de construcción de los sistemas de tratamiento



- Dimensionado de los sistemas teniendo en cuenta caudales de efluentes generados – Modelos de balance de materia aplicable

**Modelo de balances de materia y energía para el sistema, con estimaciones de las cantidades de biogás producidos y sus equivalentes energéticos.**

Para realizar el dimensionado del sistema de tratamiento se empleó un modelo matemático de cálculo planteado por Metcalf L. y Eddy H. (1977) que usan el método de Tiempo Medio de Retención Celular aplicado al balance de masa de la biomasa bacteriana.

Este método tiene en cuenta los conceptos de los procesos biológicos que ocurren dentro del biodigestor. El desarrollo del método aplica los balances en estado estacionario de masa a biomasa y sustrato.

Se aplicó la hipótesis de estado estacionario tanto en el flujo como en la homogeneidad del contenido y salida del biodigestor. Se considera el biodigestor trabajando en régimen una vez puesto en marcha y estabilizado.

En el detalle del sistema se muestran las consideraciones de diseño adoptadas para aproximar el sistema al estado estacionario.

Bajo esta primera hipótesis no existe acumulación de masa en el biodigestor por lo que la ecuación general de balance aplicable es la siguiente:

$$entra - sale + genera - consume = 0$$

**Biomasa:**

$$sale - entra = genera$$

$$Q \cdot X - Q \cdot X_0 = r_X \cdot V_h$$

Donde:

$Q$ = caudal volumétrico [lt/día]

$X_0$ =concentración de biomasa bacteriana a la entrada del reactor [g SSV/lt]

$X$ =concentración de biomasa bacteriana a la salida y dentro del reactor [g SSV/lt]

$r_x$ = velocidad de generación de biomasa [gSSV/lit.día]

$V_h$ = volumen hidráulico del reactor o volumen de la masa reaccionante [lit].

Aplicando los conceptos desarrollados en el apartado “**Cinética del crecimiento bacteriano**” podemos escribir la ecuación de balance para la Biomasa Bacteriana:

$$Q(X - X_0) = (\mu - K_d).X.V_h$$
$$\frac{Q}{V_h} \cdot (X - X_0) = \left( Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{k_s + S} - k_d \right) \cdot X$$
$$\frac{1}{TRH} \cdot (X - X_0) = \left( Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{k_s + S} - k_d \right) \cdot X$$

Donde:

$TRH$ = tiempo de residencia hidráulico [día]

$X_0$ =concentración de biomasa bacteriana a la entrada del reactor [g SSV/lit]

$X$ =concentración de biomasa bacteriana a la salida y dentro del reactor [g SSV/lit]

$\mu$ = velocidad específica de crecimiento de biomasa [gr SSV/gr SSV.día]

$Y_{X/S}$ = rendimiento biomasa/sustrato [gr SSV/gr DQO]

$K$ = máxima velocidad específica de utilización de sustrato [grDQO/gr SSV. día]

$S$ = concentración de sustrato en el reactor [gr DQO/lit]

$k_s$ = constante media de saturación [gr DQO/lit].

$k_d$ = coeficiente de respiración endógeno [día<sup>-1</sup>]

### **Balance de Sustrato:**

*entra – sale = consume*

$$Q \cdot S_0 - Q \cdot S = r_s \cdot V_h$$

Donde:

$Q$ = caudal volumétrico [lit/día]

$S_0$ =concentración de sustrato a la entrada del reactor [g DQO/lit]

$S$ = concentración de sustrato a la salida y dentro del reactor [g DQO/lit]

$r_s$ = velocidad de consumo de sustrato [gDQO/lit.día]

$V_h =$  volumen hidráulico del reactor o volumen de la masa reaccionante [lt].

Por otro lado sabemos que:

$$r_s = \frac{r_x}{Y_{XS}} = \frac{\mu \cdot X}{Y_{XS}} = \frac{K \cdot S \cdot X}{k_s + S} = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

$dS/dt =$  velocidad de consumo de sustrato [gDQO/lt.día].

Reemplazando en la ecuación de balance de sustrato y reordenando:

$$\frac{1}{TRH} \cdot (S_0 - S) = \frac{K \cdot S \cdot X}{k_s + S} = \frac{ds}{dt}$$

Como se puede observar las dos ecuaciones de balance de masa tanto de sustrato como de biomasa bacteriana quedan expresadas en función del tiempo de residencia hidráulico (TRH).

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) es una de las variables de diseño que se adopta en función de la naturaleza de la materia orgánica a estabilizar, la temperatura media ambiental y la del efluente.

La hipótesis que usa el método es que no existe biomasa en la alimentación del reactor, por lo tanto  $X_0 = 0$ .

Si bien la alimentación contiene biomasa bacteriana proveniente de las heces y de las fosas debajo de los corrales, esta no es tomada en cuenta frente a la concentración de biomasa existente en el reactor una vez que este se encuentra en estado estacionario. Además en la mayoría de los casos se realiza una inoculación del reactor por medio de lodos con alta concentración de biomasa bacteriana para acortar los tiempos de arranque y entrada en régimen, por lo tanto, es válida esta simplificación.

Aplicando esta hipótesis a las ecuaciones de balance tenemos que para el caso de biomasa bacteriana resulta:

$$\frac{1}{TRH} = Y_{XS} \frac{K \cdot S}{k_S + S} - k_d$$

De la cuál puede determinarse la concentración de sustrato en la salida y en el reactor:

$$S = \frac{k_S(1 + k_d \cdot TRH)}{TRH \cdot (Y_{XS} \cdot K - k_d) - 1}$$

Como se puede ver la concentración de sustrato en el interior y en la salida del reactor sólo dependen de parámetros cinéticos de la biomasa y del tiempo de retención hidráulico, lo cual es lógico.

Un parámetro muy importante a determinar en este método y en los sistemas de tratamiento continuo y semicontinuo es el tiempo mínimo de retención hidráulico o tiempo mínimo de retención celular definido anteriormente.

Si bien estos valores se pueden calcular, existen tablas con los tiempos de retención celular sugeridos para reactores de mezcla completa (Tabla 4).

Las constantes cinéticas se encuentran en la Tabla 3 y son función del tipo de sustrato empleado en la etapa limitante del proceso, en este caso la metanogénesis.

Para la definición de las variables a tener en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH), las concentraciones de sustrato o materia orgánica a estabilizar (DQO), y la concentración de biomasa bacteriana (SSV), el volumen de CH<sub>4</sub> que se expresó en unidades de volumen en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT), y los caudales a tratar en cada biodigestor.

Para estimar los caudales a tratar en cada biodigestor se determinó el factor de dilución existente resultante del empleo de agua para limpieza y barrido de excretas en los corrales.

Las variables para el diseño de los bioreactores fueron: caudal (Q), alimentación (S<sub>0</sub>), biomasa (X<sub>0</sub>), pH, temperatura, TRH, rendimiento (Y<sub>S<sub>x</sub>/S</sub>), factor de dilución (K<sub>d</sub>), producción de metano (AME).

## Diseño y dimensiones de los biodigestores. Recomendaciones de instalación y montaje

### Volumen hidráulico de los biodigestores (VHR):

Se determinaron teniendo en cuenta el caudal de alimentación y el TRH sugerido de Tabla 5 para estiércol porcino líquido:

$$VHR[lt] = Q \left[ \frac{lt}{d} \right] \cdot TRH[d]$$

### Estabilización de materia orgánica (DQO):

Metodología 1:

- Determinación de carga de DQO:

$$carga\ de\ DQO \left[ \frac{gDQO}{d} \right] = Q \cdot S_0$$

- Determinación de la carga volumétrica del reactor:

$$Carga\ volumétrica \left[ \frac{gDQO}{d \cdot lt_{vh}} \right] = \frac{carga\ DQO}{V_h}$$

- Determinación de la biomasa producida:

En este punto se define la eficiencia en la utilización de sustrato indicado anteriormente ( $0,6 < \varepsilon < 0,9$ , - Metcalf L. y Eddy H., 1977)

Valor medio= $\varepsilon=0.75$ (valor adoptado)

$$\frac{dX}{dt} \left[ \frac{dSSV}{d} \right] = \frac{Y_{XS} \cdot \frac{dS}{dt}}{1 + k_d \cdot TRH}$$

Donde:

$$\frac{dS}{dt} \left[ \frac{gDQO}{d \cdot lt_{vh}} \right] = \varepsilon \cdot carga\ DQO$$

Reemplazando resulta:

$$\frac{dX}{dt} \left[ \frac{gSSV}{d} \right] = \frac{Y_{XS} \cdot \varepsilon \cdot \text{carga DQO}}{1 + k_d \cdot TRH}$$

- Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO:

$$DQO \text{ removida } [\%] = \frac{\varepsilon \cdot \text{carga DQO} - 1,42 \frac{dX}{dt}}{\text{carga DQO}} \cdot 100$$

**Determinación de los volúmenes de metano (CH<sub>4</sub>) y biogás producidos:**

$$\text{Producción } CH_4 \left[ \frac{lt}{d} \right] = Rto \text{ } CH_4 \cdot (\varepsilon \cdot \text{carga DQO} - 1,42 \cdot \frac{dX}{dt})$$

Metodología 2:

Otro método que se utilizó para el cálculo de la producción de CH<sub>4</sub> emplea la actividad metanogénica específica (AME), siendo este un método simplificado y aproximado.

$$\text{Producción de } CH_4 - AME \left[ \frac{lt}{d} \right] = VHR \cdot X_0 \cdot AME \cdot Rto \text{ } CH_4 \cdot \text{eficiencia reactor}$$

Donde:

*AME= actividad específica del lodo de inoculación=0,299 grDQOCH<sub>4</sub>/(grSSV. d)*

*Eficiencia reactor =0.75 (valor adoptado. No puede ser superior a la eficiencia de utilización de sustrato)*

*VHR= volumen hidráulico del reactor*

*X<sub>0</sub>= concentración de sólidos suspendidos volátiles en la alimentación.*

*Rto CH<sub>4</sub>=0,35 lt CH<sub>4</sub>/grDQO*

Con estos datos se definió las dimensiones de los biodigestores. Teniendo en cuenta estas relaciones se puede conocer las longitudes mínimas y máximas una vez definido el diámetro de la manga a utilizar.

El área de la zanja quedará definida por la expresión:

$$A_{zanja} = p \times \frac{(a + b)}{2}$$

El volumen de la zanja se define por la siguiente expresión:

$$V_{zanja} = VHR = A_{zanja} \times L$$

Donde:

*V<sub>zanja</sub>*: volumen de la zanja

*VHR*: volumen hidráulico del reactor.

*A<sub>zanja</sub>*: área de la zanja

*L*: longitud de la zanja

Para la determinación de los valores de a, b y p óptimos se consideraron el ángulo  $\alpha$  del talud y también la circunferencia de la manga a emplear. Estos valores se encuentran tabulados para distintos valores de  $\alpha$  y los porcentajes de volumen hidráulico y gaseoso (gasómetro) respecto del volumen total del biodigestor.

Se calculó el volumen total del reactor (VTR) y el volumen del gasómetro o cámara de gas (VG) ya que forma parte de la misma unidad, teniendo en cuenta las siguientes fórmulas:

$$VTR [m^3] = \frac{VHR [m^3]}{0,75}$$

Donde:

*VTR [m<sup>3</sup>]*: volumen total del reactor o biodigestor en metros cúbicos.

*VHR [m<sup>3</sup>]*: volumen hidráulico del reactor en metros cúbicos.

$$VG [m^3] = VTR [m^3] \times 0,25$$

Donde:

*VG [m<sup>3</sup>]*: volumen del gasómetro en metros cúbicos

## **Propuesta del Sistema de Tratamiento**

Se realiza la propuesta a la empresa para el diseño del sistema de tratamiento, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Caudal de efluentes a tratar
- Construcción: zanja y biodigestores
- Ubicación
- Sistema de salidas de efluente tratado
- Sistema de cañerías y válvulas
- Sistema de agitación y mezcla
- Sistema de seguridad de biogás
- Sistema de filtración de sulfuro de hidrógeno
- Instalación de equipo soplador para el biogás
- Sistema de inflado y llenado de los biodigestores

## **Comparativa de impactos ambientales del proyecto**

Se realizó la comparativa de impactos ambientales tomando como base el “Estudio de Impacto Ambiental” realizado por el estudio Hugo Salas en el año 2009 para el Proyecto de Producción de Engorde a Corral para Ganado Vacuno (Feedlot) y Granja Porcina. En dicho estudio se aplicó la metodología de lista de consultas para evaluar los posibles impactos en el área del proyecto.



## RESULTADOS Y DISCUSIONES

El desarrollo del proyecto se aplicó a una granja de cerdos de ciclo completo denominado “Granja porcina y Feedlot La Virginia” en el establecimiento Ayala ubicado en el km16 de la Ruta Provincial N°317, en la localidad de La Ramada de Abajo en el departamento Burruyacú en el noreste de la provincia de Tucumán distante a unos 40 Km de la capital provincial.

La geolocalización del emprendimiento es 26°44'13,7”S; 64°49'38,6” a 418msnm (Figura 4).

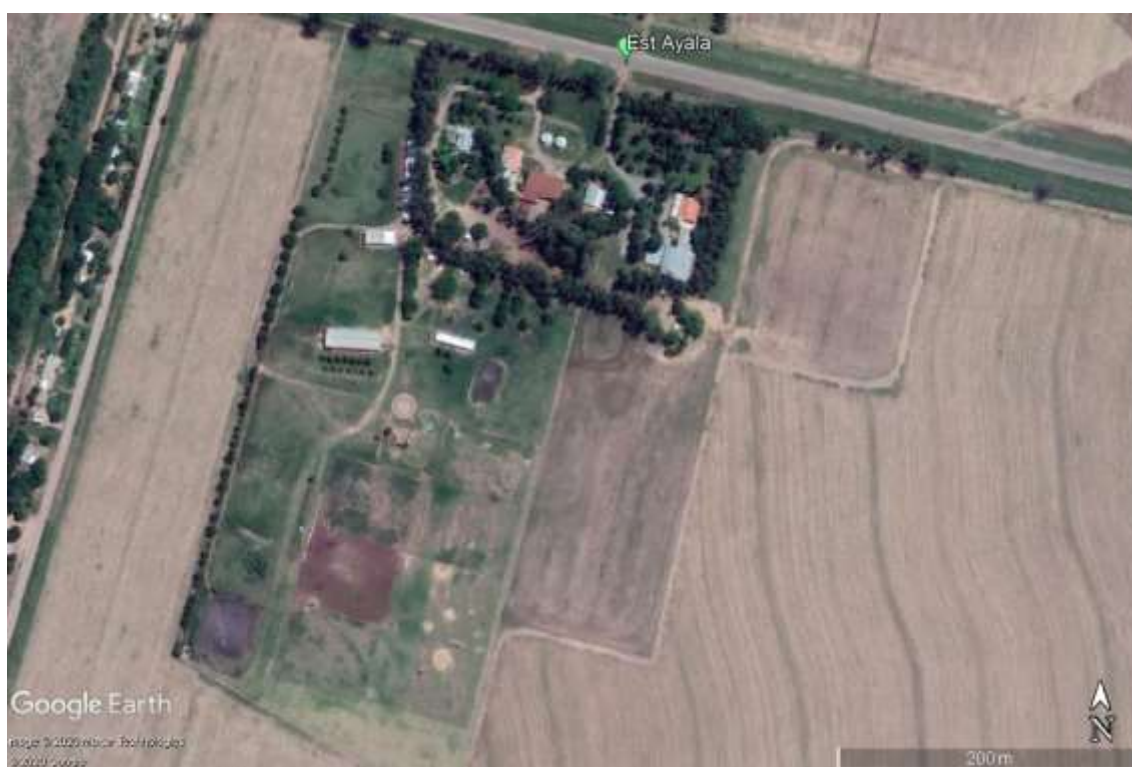


Figura 4. Vista satelital del Establecimiento Ayala, Granja La Virginia. (Google Earth, fecha de toma de foto 24-06-2020).

El tipo de clima de la zona según la clasificación climática de W. Köppen-Geiser es Cwah (cálido y templado) con invierno seco, con temperatura de mes más cálido superior a 22°C, temperatura media anual menor a 18°C y la del mes más frío es inferior a 18°C.

En el ámbito del predio, las temperaturas medias anuales oscilan entre 18°C y 20°C. En verano las temperaturas medias oscilan entre 24°C y 26°C

pudiendo alcanzar máximas de entre 40°C a 45°C y en invierno las temperaturas medias oscilan entre 10°C y 12°C pudiendo alcanzar registros por debajo de los 0°C a campo abierto (Salas H., Estudio de Impacto ambiental, 2009).

Esta explotación porcina intensiva posee un sistema de producción sobre pisos con desnivel a canales de recolección y *sobre fosa* (Figura 5), es decir, los animales están alojados en corrales sobre piso enrejado por los que caen las deyecciones, el agua de limpieza y el desecho, tanto de alimentos como de agua de bebida de los animales a una fosa de recolección para luego eliminarse por canales propios del establecimiento. De manera que se produce una gran cantidad de **purín** de consistencia casi líquida pero con una elevada carga en materia orgánica, nitrógeno y fósforo principalmente.

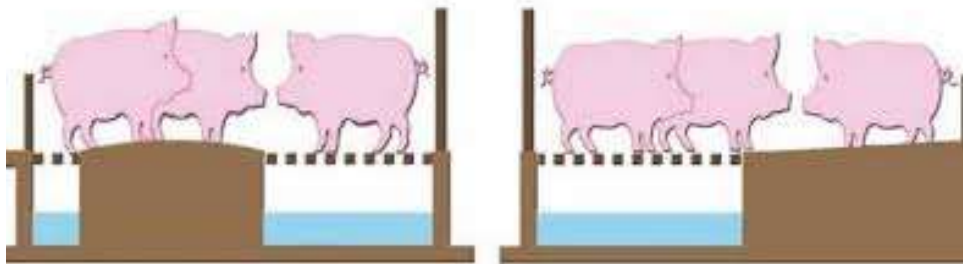


Figura 5. Esquema de corral sobre fosa con recolección de deyecciones animales y residuos

Las etapas del ciclo completo comprenden el servicio y reproducción (Figura 6), la etapa de maternidad (Figura 7), la etapa de recría (Figura 8) y la etapa de engorde o finalización de ciclo (Figura 9) donde los animales llegan al peso para venta a frigorífico (Tabla 17). La distribución de las diferentes etapas dentro de la granja puede verse en la Figura 10.

La capacidad máxima de trabajo era de 600 animales, con proyección de aumento de hasta 800 animales.

Al momento de realizarse el relevamiento la granja presentaba una cantidad de animales de 558 distribuidos según se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Distribución de animales según el ciclo de cría. Fuente: relevamiento *in situ* fecha 18-03-2020

Etapa del ciclo	Cantidad de animales	Peso [kg]	Peso promedio [Kg]
Reproducción	68	150-220	160
Maternidad	100	<8	7
Recría	90	8-20	15
Engorde	300	20-100	70



Figura 6. Etapa de reproducción.



Figura 7. Etapa de maternidad



Figura 8. Etapa de recría.



Figura 9. Etapa de engorde y terminación.

El sistema de trabajo es continuo y con carga animal distribuida a lo largo del año notándose una reducción en el número de animales hacia el verano debido a la demanda que presenta el mercado.



Figura 10. Distribución de etapas de producción porcina de La Virginia. (Google Earth, fecha de toma de foto 24-06-2020).

La alimentación se realiza con diferentes tipos de raciones dependiendo de los ingredientes que se produzcan en la zona como ser granos de maíz, subproductos de la industria y núcleos proteicos y vitamínicos. El alimento para cada etapa y categoría de animales se prepara en el establecimiento en las instalaciones destinadas para tal fin teniendo su fuerte en el alimento balanceado con base en el maíz (Salas H., 2009). El consumo de alimento ronda los 500 a 700 kg/día.

Según lo detallado por los propietarios, la alimentación consiste en alimento seco a base de maíz molido, expeller de soja y premezclas según requerimientos.

La relación agua/alimento es 4/1, aproximadamente, y la relación maíz/expeller de soja es 3/1, aproximadamente.

Durante la realización de este trabajo se mantuvieron las condiciones de alimentación indicadas.

Las excretas se manejan recolectándolas diariamente por limpieza con agua de los corrales a través a canales secundarios los que confluyen a un canal principal que alimenta una laguna donde se hace la captación general de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (Figuras 11 y 12). Las dimensiones de la laguna son de 25mx40mx4m de profundidad (4000 m<sup>3</sup>).

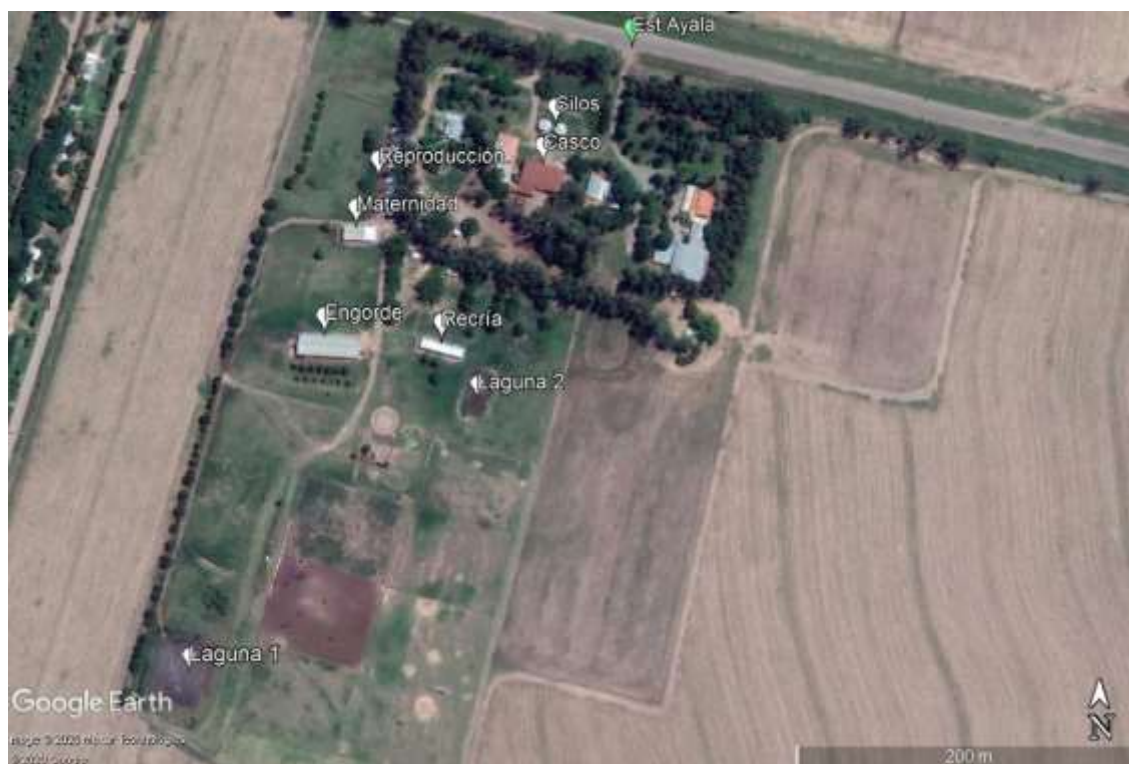


Figura 11. Distribución de etapas de producción porcina y ubicación de lagunas de La Virginia. (Google Earth, fecha de toma de foto 24-06-2020).

La etapa de recría se encuentra separada del resto de las etapas y las excretas confluyen a una laguna de dimensiones 30mx10mx2m de profundidad (600 m<sup>3</sup>) (Figuras 11 y 13).

Ambas lagunas funcionan como acumuladores de desechos donde se produce la evaporación de una parte importante del agua que forma parte del purín, y por otra parte se produce degradación y estabilización de la materia orgánica con importante producción de lodos.

Las lagunas son de tipo facultativo con una fase superior aeróbica y una inferior anaeróbica ya que se encuentran a cielo abierto.

Este tipo de gestión de residuos produce olores nauseabundos y promueve las condiciones para la proliferación de insectos y alimañas.

Se debe resaltar el hecho que no se producen vuelcos a cursos de agua y que tampoco se aplica a campo en forma directa.

Todas las emisiones de gases resultantes del proceso, entre ellos el  $\text{CH}_4$ , son venteados a la atmósfera desaprovechando su potencial utilización por la incapacidad actual de captación.



Figura 12. Laguna recolectora de purines de cerdo provenientes de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (capacidad 4000 m<sup>3</sup>).



Figura 13. Laguna recolectora de purines provenientes de la etapa de recría (capacidad 600 m<sup>3</sup>).

Ante esta problemática se analizó la posibilidad de realizar un estudio de factibilidad de implementación de un sistema de tratamiento integral de los residuos porcinos por medio de biodigestores anaeróbicos.

El sistema que se consideró es el de reactores tubulares flexibles de bajo costo como una posibilidad que entusiasme al productor a llevar adelante el proyecto, en comparación con los sistemas tradicionales que implican inversiones importantes para obtener un resultado similar.

Se explicaron los beneficios que se obtienen con el uso de biodigestores anaeróbicos y la utilidad que se puede dar a los productos resultantes del tratamiento de los desechos.

Se relevó el terreno y las instalaciones existentes para determinar disponibilidad de espacios y la ubicación más conveniente para la instalación del sistema.

Se propuso emplear los canales de drenaje existentes para aprovechar la infraestructura ya construida reduciendo así costos de construcción.

El primer paso fue estimar los volúmenes de desechos o purines generados en el emprendimiento empleando tabulaciones existentes. Se empleó esta herramienta ante la imposibilidad de medir caudales.

## GENERACIÓN DE PURINES

En la Tabla 18 se observan los valores de excretas diarias obtenidos teniendo en cuenta las etapas fisiológicas durante el crecimiento de los animales.

Tabla 18. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica (INTA, 2012).

<b>Etapas reproductiva</b>	<b>Peso vivo [Kg]</b>	<b>Volumen [lt/día]</b>	<b>Promedio [lt/día]</b>	<b>Materia sólida [%]</b>
<b>Lechones hasta 3 semanas</b>	5		1,0	10
<b><i>Lechones destetados</i></b>	12	1,5-2,5	2,0	10
<b>Cerdos de engorde con alimento solo</b>	50	2,0-5,5	4,0	10
<b>Cerdos de engorde con agua:alimento (2.5:1)</b>	50	2,0-5,0	4,0	10
<b>Cerdos de engorde con agua:alimento (4:1)</b>	50	4,0-9,0	7,0	6.0
<b>Cerdos engordados con subproductos alimenticios</b>	50	variable	15,0	10
<b>Cerdos engordados con suero</b>	50	14,0-17,0	14,0	2
<b>Verraco</b>	200		5,0	10
<b>Cerda destetada (seca)</b>	150		4,5	10
<b>Cerda con camada de 3 semanas</b>	150		15,0	10



## METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

En función de la cantidad de animales existentes, su etapa fisiológica y las cantidades promedio de producción de purín (Tabla 19), se calculó estimativamente la cantidad de desechos a tratar.

Tabla 19. Volúmenes de purín producidos de acuerdo a la etapa fisiológica.

Etapa	Peso vivo (PV) [Kg]	Cantidad de animales	Volumen unitario [lt/día]	Volumen producido [lt/día]
Verraco	200	10	5	50
Cerda con camada de 3 semanas	150	8	15	120
Lechones hasta 3 semanas	5	100	1	100
Cerda destetada seca	150	50	4,5	225
Lechones destetados	12	90	2	180
Cerdos de engorde con alimento solo	50	300	4	1200
<b>Volumen total de purín producido [lt/día]</b>				<b>1875 lt/día</b>

Los resultados de la caracterización de purín a la salida de los corrales antes de la entrada a las lagunas de tratamiento se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de caracterización de muestra de purín de cerdo.

Muestra	pH	DQO [mg/lt]	ST [g/lt]	SF [g/lt]	SV [g/lt]	SST [g/lt]	SSF [g/lt]	SSV [g/lt]	AME <sup>1</sup>
Promedio	7,32	13890	11,41	5,12	6,30	3,21	0,76	2,45	0,202
DS	0,02	410	0,35	0,23	0,12	0,57	0,23	0,33	

<sup>1</sup> [gDQOCH<sub>4</sub>/gSSV.d]

La densidad de la muestra fue próxima a la del agua, por lo tanto, se tomó como valor 1kg/lt como se indicó en anteriormente. La temperatura de las muestras fue próxima a los 21°C.

Los resultados de caracterización de lodos anaeróbicos de la laguna recolectora de las etapas de reproducción, maternidad y engorde se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores de caracterización de lodos anaeróbicos de la laguna recolectora de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (Laboratorio de Investigaciones Ambientales, EEAOC).

<b>ST</b> <b>[g/lt]</b>	<b>SF</b> <b>[g/lt]</b>	<b>SV</b> <b>[g/lt]</b>	<b>SST</b> <b>[g/lt]</b>	<b>SSF</b> <b>[g/lt]</b>	<b>SSV</b> <b>[g/lt]</b>	<b>AME</b> <b>[gDQOCH<sub>4</sub>/gSSV.d]</b>
102,09	58,13	43,36	88,40	47,69	40,70	0,299

Si comparamos la demanda química de oxígeno (DQO) determinada en la caracterización de los purines provenientes de los corrales con un purín típico como los de la Tabla 12 (purines compuestos por heces, orina y restos de alimento y agua de consumo), podemos observar un efecto de dilución importante. Esto se debió probablemente a un exceso en el agua de limpieza que se incorpora al purín producido por los animales debido al diseño de los corrales sobre fosa, es decir, en las fosas se produce la mezcla de purines y agua de lavado que posteriormente se elimina de los corrales.

Teniendo en cuenta el posible exceso de volumen en la cantidad de purín generado y sabiendo que el volumen del biodigestor está relacionado a esta variable fue de esperarse que los tamaños requeridos de reactor sean más grandes de lo que correspondería a un purín sin exceso de agua.

De acuerdo a los datos relevados en la granja, el empleo de agua diaria fue de 7000 litros de los cuales 50% se usaba para bebederos y el otro 50% para limpieza en general de corrales.

Como vimos anteriormente, el manejo de las excretas se realiza separadamente, recolectando por un lado las que provienen de las etapas de reproducción, maternidad confluyen a un canal uniéndose luego con un segundo

canal proveniente de la etapa de engorde enviándose por medio de canal abierto a la laguna 1.

Por otro lado las excretas de la etapa de recría que son conducidas a la laguna 2 por medio de cañerías (Figura 11) (mapa satelital obtenido de Google Earth).

Para el manejo integral de las excretas se planteó la instalación de tres biodigestores tubulares. Dos de igual volumen a ser colocados en paralelo que captarán las excretas de las etapas de reproducción, maternidad y engorde, y un tercer biodigestor para la etapa de recría. Los tres biodigestores deberían ser instalados entre los corrales y las lagunas, lo más cerca posible de los posibles puntos de consumo de biogás para economizar en instalaciones de conducción y facilitar su consumo como se describe en la Figura 14.



Figura 14. Distribución de etapas de producción de La Virginia y ubicación propuesta de los biodigestores. (Google Earth, fecha de toma de foto 24-06-2020).

Los biodigestores fueron dimensionados en función de los caudales generados y que normalmente son conducidos a las lagunas.

Los tipos de biodigestores propuestos para ser utilizados serán del tipo tubular flexible de polietileno de alta densidad (HDPE) tricapa construidos a partir de silobolsa comercial de 6 y 9 ft de diámetro, con mezcla por bombeo para mejorar el contacto de la biomasa bacteriana y el sustrato a digerir (carga orgánica).

En los biodigestores tubulares se considera importante conseguir que la carga de entrada al biodigestor (mezcla de estiércol y agua) tenga entre un 3% y 5% de sólidos totales (ST) como rango deseable, siendo posible ingresar cargas con menor % de ST, pero no es recomendable con valores mayores a los definidos en el rango deseable (Marti Herrero J., 2019)

En el caso particular de los purines analizados como sustrato para alimentar el sistema la carga de sólidos totales (ST) se encontraban alrededor de 1,17%.

### **Diseño y dimensiones de los biodigestores. Recomendaciones de instalación y montaje.**

Como vimos anteriormente, la granja se encuentra en una zona donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 18°C y 20°C. Esto nos permitió definir una de las variables importantes a tener en cuenta la cual está directamente relacionada con el tiempo de retención hidráulico.

Se definió como temperatura media para el diseño 19°C, valor que se encuentra en el rango mesofílico.

El tiempo de retención hidráulico (TRH) sugerido para estiércol porcino líquido en el rango mesofílico es de 15-25 días (Hilbert J.A., 2011). En nuestro caso se adoptó para el diseño el valor de TRH=25 días.

El modelo considera que la fuente principal de CH<sub>4</sub> es el CH<sub>3</sub>COOH a partir del cual se produce la mayor transformación. El resto del CH<sub>4</sub> se produce a partir de la reducción del CO<sub>2</sub> por medio del H<sub>2</sub> que se remueve de los compuestos

orgánicos por medio de las enzimas (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012). Esto nos define las variables cinéticas de las reacciones biológicas (Tabla 3).

Teniendo en cuenta los caudales a tratar, se observó que al realizar el lavado de los pisos de los corrales se redujo el % de ST por efecto de dilución a la vez que se incorporan sólidos inertes como tierra o arena. Esto es normal cuando se trabaja con cerdos estabulados. Sin embargo, se debe tener cuidado de no emplear agua en exceso para no perjudicar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento propuestos.

La cantidad de agua empleada para limpieza fue de 3500lt/día, mientras que el volumen de excretas generadas por los animales fue de 1875lt/día de acuerdo a la Tabla 22.

Tabla 22. Relación de agua de limpieza/purín y factor de dilución.

<b>Volumen total Purín generado [lt/d]</b>	1875
<b>Agua de limpieza [lt/d]</b>	3500
<b>Volumen total a tratar [lt/d]</b>	5375
<b>Relación agua/purín</b>	1,9
<b>Factor de dilución</b>	2,9
<b>Ecuación de generación [lt/d]</b>	2,9 x volumen purín

La relación agua/purín determinada fue razonable y se encontraba por debajo de la cantidad mínima recomendada de 4:1 para purines de cerdo (Marti Herrero J., 2019).

Tabla 23. Estimación de caudales a tratar en cada biodigestor

<b>Destino</b>	<b>Etapas</b>	<b>Purín [lt/d]</b>	<b>Caudal [lt/d]</b>
<b>Laguna 1</b>	Reproducción+maternidad	495	1419
<b>Laguna 1</b>	Engorde	1200	3440
<b>Laguna 2</b>	Lechones destetados (recría)	180	516

Para los caudales a ser tratados se consideraron los volúmenes de purín estimados (Tabla 23). En este caso la recría corresponde a los lechones destetados. El resto de los purines corresponden a las etapas restantes. Se denominó Biodigestor 1 y 2 a los biodigestores que captarán el purín diluido proveniente de las etapas de reproducción, maternidad y engorde, y Biodigestor 3 al que captará el purín diluido proveniente de la etapa de recría.

Las variables de diseño del Biodigestor 1 y 2, fueron las siguientes (Tabla 24):

Tabla 24. Resumen de las variables de diseño Biodigestor 1 y 2.

Q [lt/día]	S <sub>0</sub> [gDQO/lt]	X <sub>0</sub> [gSSV/lt]	pH	Temp [°C]	TRH [d]	Y <sub>xs</sub> [gSSV/gDQO]	K <sub>d</sub> [d <sup>-1</sup> ]	AME [gDQO/gSSV.d]
2429,5	13,89	2,45	7,3	19	25	0,054	0,038	0,202

Las variables de diseño del Biodigestor 3 son las siguientes (Tabla 25):

Tabla 25. Resumen de las variables de diseño Biodigestor 3.

Q [lt/día]	S <sub>0</sub> [gDQO/lt]	X <sub>0</sub> [gSSV/lt]	pH	Temp [°C]	TRH [d]	Y <sub>xs</sub> [gSSV/gDQO]	K <sub>d</sub> [d <sup>-1</sup> ]	AME [gDQO/gSSV.d]
516	13,89	2,45	7,3	19	25	0,054	0,038	0,202

Un parámetro de diseño es la eficiencia en la utilización o remoción del sustrato que se desea obtener cuando los biodigestores se encuentran en régimen. Esta eficiencia se encuentra entre el 60% y el 90%. La eficiencia que se adoptó en la utilización de sustrato fue  $\varepsilon=0,75$ .

El rendimiento teórico en la producción de CH<sub>4</sub> fue de 350 lt CH<sub>4</sub>/kg DQO, y el contenido de CH<sub>4</sub> en biogás fue de 65%

### Volumen hidráulico de los biodigestores (VHR):

En la Tabla 26 se observan los VHR obtenidos para los 3 Biodigestores propuestos.

Tabla 26. Volúmenes hidráulicos de los biodigestores propuestos.

	VHR [lt]	VHR [m <sup>3</sup> ]
<b>Biodigestor 1 y 2</b>	60750	61
<b>Biodigestor 3</b>	12900	13

El volumen total de cada uno de los biodigestores se calculó teniendo en cuenta el volumen de biogás producido, ya que el biodigestor y gasómetro (cámara de gas) formarán una sola unidad operativa. El volumen de la cámara de gas se definió como un 25% del volumen total del biodigestor o con un equivalente mínimo a la producción de biogás de 1 día del biodigestor en cuestión, el que sea mayor, a los efectos de amortiguar las fluctuaciones de consumo.

La determinación del volumen hidráulico de los biodigestores (VHR) se realizó con las condiciones de funcionamiento de los corrales en el momento de la investigación.

Para el dimensionado completo de los biodigestores se estimó la cantidad de CH<sub>4</sub> producido y por consiguiente de biogás. Para ello se emplearon dos métodos. Por un lado el modelo teniendo en cuenta las ecuaciones de balance desarrolladas precedentemente y por otro lado el método simplificado a partir del empleo de la actividad metanogénica específica (AME) para purín diluido a tratar.

El conjunto de ecuaciones a emplear se detalla a continuación y los resultados se presentan en las Tablas 27 y 28.

### **Estabilización de materia orgánica**

Se estimó teniendo en cuenta la carga y remoción de DQO en relación con los volúmenes de CH<sub>4</sub> y Biogás (Tabla 27).

Tabla 27. Detalle de variables de funcionamiento de los biodigestores con su correspondiente eficiencia en la remoción de DQO, volúmenes de CH<sub>4</sub> y Biogás producidos.

	<b>Q.S<sub>0</sub></b> [gDQO/d]	<b>Q.S<sub>0</sub>/V<sub>h</sub></b> [gDQO/(d.lt <sub>v<sub>h</sub></sub> )]	<b>ε</b>	<b>dX/dt</b> [gSSV/d]	<b>DQOremovida</b> [%]	<b>Prod. CH<sub>4</sub></b> [lt/d]	<b>Prod. Biogás</b> [lt/d]
<b>Biodig 1 y 2</b>	33746	0,5556	0,75	701	72,05	8510	13092
<b>Biodig 3</b>	7167	0,5556	0,75	149	72,05	1807	2781

El valor calculado de DQO removido teórico fue razonable y se encontró dentro de los valores que se obtienen en la práctica (60% a 85%).

Para aplicar el segundo método para el cálculo de la producción de CH<sub>4</sub> empleando la actividad metanogénica específica (AME), se debió suponer que el biodigestor se encuentra a la misma concentración de SSV que la alimentación y se aplica una eficiencia de funcionamiento al reactor.

El valor de AME que se empleó fue el de los lodos de inoculación ya que se puede suponer que una vez alcanzado el régimen de funcionamiento la actividad metanogénica se ve favorecida por la producción de la biomasa bacteriana propia del proceso.

En la Tabla 28 se presentan los resultados de las producciones de CH<sub>4</sub> y biogás.

Tabla 28. Producción de CH<sub>4</sub> y Biogás de Biodigestores 1, 2 y 3 empleando método simplificado AME

	<b>VHR</b> [lt]	<b>X<sub>0</sub></b> [gr SSV/lt]	<b>AME</b> [gr DQO/gr SSV . d]	<b>CH<sub>4</sub></b> [lt/d]	<b>Biogás</b> [lt/d]
<b>Biodigestores 1 y 2</b>	60.750	2,45	0,299	7.890	12.139
<b>Biodigestor 3</b>	12.900	2,45	0,299	1.676	2.578



Comparando las tablas 27 y 28 podemos observar que la producción de  $\text{CH}_4$  calculada con el método empleando la AME fue ligeramente inferior al valor calculado con el método cinético propuesto por Metcalf L. y Eddy H, sin embargo ambos pueden ser considerados como válidos.

Las determinaciones de los volúmenes de biogás producidos permitieron determinar el volumen total de cada biodigestor al estar el gasómetro integrado a la misma unidad funcional como se mencionó anteriormente.

### **Dimensiones de los biodigestores tubulares:**

La parte más importante del biodigestor es la que conforma el volumen hidráulico. Los biodigestores tubulares construidos con materiales flexibles deben ser instalados dentro de una estructura que contenga su volumen hidráulico para asegurar su integridad mecánica y además contribuir a que su forma se aproxime a la de un cilindro. Esto se puede lograr si se instala el digestor dentro de una zanja o fosa de contención.

La forma tubular le permitirá que la entrada y la salida queden alejadas asegurándose que la carga volumétrica deberá recorrer toda la longitud del biodigestor en el tiempo equivalente al tiempo de retención hidráulica (TRH) definido como parámetro de diseño.

La forma tubular se definió en función de la relación entre la longitud del biodigestor y su diámetro (L/D) considerándose que existe la forma tubular cuando esta relación se encuentra entre 5 y 10 (Marti Herrero J., 2019).

Una relación  $L/D < 5$  indica una longitud muy corta donde la entrada y la salida están muy próximas con el inconveniente que parte de la carga orgánica atraviese el biodigestor y salga del mismo sin haber permanecido el tiempo de retención necesario para su estabilización a los niveles definidos en el diseño.

Una relación  $L/D > 10$  indica una longitud excesiva que si bien asegura que la entrada y la salida se encuentran lo suficientemente alejadas pueden presentarse problemas de acumulación de lodos en la sección media del biodigestor. Esto se debe a que la entrada de carga no produce la turbulencia necesaria para mantener en movimiento los sólidos acumulados.

La relación óptima entre la longitud y el diámetro para un biodigestor tubular es 7,5 (Marti Herrero J., 2019).

$$\frac{L}{D} \text{ óptimo} = 7,5$$

La zanja de contención se construirá con forma trapezoidal con las paredes inclinadas para evitar ayudando que se produzcan derrumbes. El volumen de la zanja será igual al volumen hidráulico del biodigestor.

El área trapezoidal de la sección transversal de la zanja nos indica, en forma aproximada, los metros cúbicos que albergará el biodigestor por metro lineal de zanja. Se debe tener presente que el perímetro del área trapezoidal de la zanja debe ser menor al perímetro de la circunferencia de la manga (Figura 15).

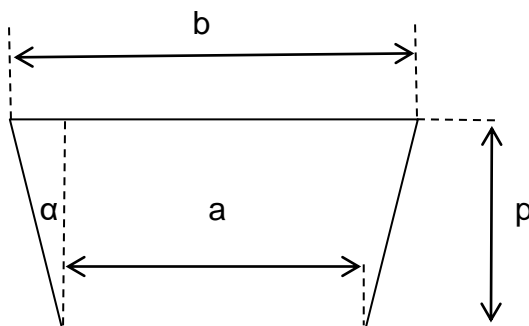


Figura 15. Principales variables de sección transversal de zanja trapezoidal.

Las dimensiones óptimas de a, b y p dependen fuertemente del tipo de suelo donde se va a instalar la zanja ya que esto condiciona del ángulo  $\alpha$  del talud de las paredes. Los suelos sueltos y arenosos necesitan taludes de  $\alpha$  de entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , mientras que los suelos arcillosos tendrán valores de  $\alpha$  de  $7,5^\circ$  a  $30^\circ$ . (Marti Herrero J., 2019)

Las dimensiones a, b y p como así también el área de la zanja, el área del gasómetro y el área total se expresan en función del radio (r) de la circunferencia de la manga adoptada (Tabla 29) (Marti Herrero J., 2019).

Tabla 29. Parámetros de dimensionado de zanjas de biodigestores tubulares a partir de del ángulo  $\alpha$  y el radio de la circunferencia de manga tubular (Marti Herrero J., 2019).

$\alpha$	% $V_{\text{hidráulico}}$	% $V_{\text{gasómetro}}$	a [m]	b [m]	p [m]	$A_{\text{zanja}}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{\text{gasómetro}}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{\text{total}}$ [m <sup>2</sup> ]
0°	88	12	1,49 r	1,49 r	1,57 r	2,34 r <sup>2</sup>	0,32 r <sup>2</sup>	2,65 r <sup>2</sup>
0°	83	17	1,41 r	1,41 r	1,57 r	2,22 r <sup>2</sup>	0,45 r <sup>2</sup>	2,67 r <sup>2</sup>
0°	80	20	1,34 r	1,34 r	1,57 r	2,10 r <sup>2</sup>	0,53 r <sup>2</sup>	2,63 r <sup>2</sup>
7,5°	80	20	1,23 r	1,63 r	1,54 r	2,20 r <sup>2</sup>	0,55 r <sup>2</sup>	2,75 r <sup>2</sup>
15°	76	24	1,02 r	1,82 r	1,49 r	2,12 r <sup>2</sup>	0,69 r <sup>2</sup>	2,80 r <sup>2</sup>
30°	75	25	0,72 r	2,26 r	1,33 r	1,98 r <sup>2</sup>	0,66 r <sup>2</sup>	2,64 r <sup>2</sup>
45°	65	32	0,43 r	2,57 r	1,07 r	1,61 r <sup>2</sup>	0,86 r <sup>2</sup>	2,47 r <sup>2</sup>

Se determinaron las dimensiones de los biodigestores a emplear a partir de los volúmenes hidráulicos (VHR) calculados indicados en la Tabla 26 y los volúmenes de biogás producidos indicados en la Tabla 27. Para ello se adoptó un 75 % de volumen hidráulico (VHR) respecto del volumen total del biodigestor (VTR). Normalmente ese valor varía en el rango del 65 al 90% dependiendo de variables como producción diaria de biogás, consumo, aplicación del biogás, etc.

Se realizó una comparación entre el volumen del gasómetro (VG) y el volumen teórico de biogás producido diariamente. Se adoptó como criterio que el volumen VG debe poder contener al menos la producción diaria de biogás para amortiguar fluctuaciones de consumo y lograr una provisión estable del fluido.

Para poder seleccionar la manga con la que se construirán los biodigestores se usaron los datos de silobolsas de 6 ft (1,83 m) de diámetro y 9 ft (2,74 m) de diámetro y 200 ft (61 m) de largo.

El tipo de suelo (Salas H., 2009) donde se recomendó realizar las excavaciones para las zanjas de contención permiten trabajar con ángulo de taludes de 15°. Se determinaron todas las dimensiones de la zanja a partir de la Tabla 29 y se calculó el valor L/D, parámetro que nos permitió seleccionar la

manga más adecuada. Se descartaron los biodigestores con relaciones L/D mayores a 10 y menores a 5.

Para el caso en donde los silobolsas entraban en el rango recomendado de la relación L/D se seleccionó el más próximo al valor  $L/D_{\text{óptimo}}$  de 7,5 (Tablas 30 y 31).

Tabla 30. Determinación de la relación L/D para silobolsas de 6ft y 9ft de diámetro para los biodigestores 1 y 2.

$\alpha$	D [ft]	D [m]	VHR [m <sup>3</sup> ]	VHR/VTR	a [m]	b [m]	p [m]	A <sub>zanja</sub> [m <sup>2</sup> ]	L [m]	L/D
15°	6	1,83	61	0,75	0,93	1,66	1,36	1,77	34	18,7
15°	9	2,74	61	0,75	1,40	2,50	2,04	3,99	15	5,6

Se descartó el uso de silobolsa de 6 ft (1,83 m) de diámetro debido a que la relación L/D estaba por encima de 10. A partir de estos resultados se adoptó para la construcción de los biodigestores 1 y 2 el silobolsa de 9 ft (2,74 m) cuya relación L/D fue de 5,6.

Tabla 31. Determinación de la relación L/D para silobolsas de 6ft y 9ft de diámetro para el biodigestor 3.

$\alpha$	D [ft]	D [m]	VHR [m <sup>3</sup> ]	VHR/VTR	a [m]	b [m]	p [m]	A <sub>zanja</sub> [m <sup>2</sup> ]	L [m]	L/D
15°	6	1,83	13	0,75	0,93	1,66	1,36	1,77	7,3	4,0
15°	9	2,74	13	0,75	1,40	2,50	2,04	3,99	3,2	1,2

Se descartó la posibilidad de emplear silobolsa en las dos medidas de diámetro para la construcción del biodigestor 3 puesto que no cumplía con el criterio de la relación L/D. Para resolver el tratamiento por biodigestión de los desechos de la etapa de recría se deberá adoptar otro tipo de sistema.

Se realizó una comparación entre el volumen del gasómetro y el volumen de biogás producidos diariamente para los biodigestores 1 y 2 en silobolsa de 9ft

de diámetro como verificación del volumen de gasómetro adoptado como criterio de diseño (Tabla 32).

Tabla 32. Comparación de volumen de gasómetro (VG) y volumen de biogás producido en biodigestores 1 y 2. Relación VHR/VTR=0,75.

VHR [m <sup>3</sup> ]	VTR [m <sup>3</sup> ]	VG [m <sup>3</sup> ]	VolBiogas [m <sup>3</sup> /dia]	VG/Vol. Biogás [días]
61	81	20	13,1	1,52

La relación que se adoptó de 75% de volumen hidráulico del reactor (VHR) respecto del volumen total del reactor (VTR) fue adecuada y permitió obtener un volumen de gasómetro capaz de acumular una vez y media la producción teórica diaria de biogás o lo que es lo mismo, un día y medio de producción teórica de biogás (Tabla 32).

Con esto se logró definir las dimensiones tanto del biodigestor (Tabla 33), como de la zanja de contención (Tabla 34), y se seleccionó el diámetro de silobolsa a emplear.

Tabla 33. Dimensiones principales de biodigestores 1 y 2.

D [ft]	D [m]	VHR [m <sup>3</sup> ]	VHR/VTR	VG [m <sup>3</sup> ]	L [m]	L/D
9	2,74	61	0,75	20	15	5,6

Tabla 34. Dimensiones principales de zanja de contención de biodigestores 1 y 2.

$\alpha$	a [m]	b [m]	p [m]	A <sub>zanja</sub> [m <sup>2</sup> ]	L [m]
15°	1,4	2,5	2,04	3,99	15

### Propuesta de los Biodigestores:

A continuación se realiza la propuesta para el sistema de tratamiento, el cual se recomienda estará compuesto por dos biodigestores tubulares instalados en paralelo (Figura 16) que recibirán los desechos porcinos provenientes de los corrales de reproducción, maternidad y engorde a través de un canal abierto que confluirá a dos cubas de mampostería receptoras de alimentación (Figura 16) que cumplirán la función de equalizadores de carga y a su vez producirán el sello hidráulico necesario para el correcto funcionamiento de los biodigestores evitando el escape de biogás producto de la digestión anaeróbica.

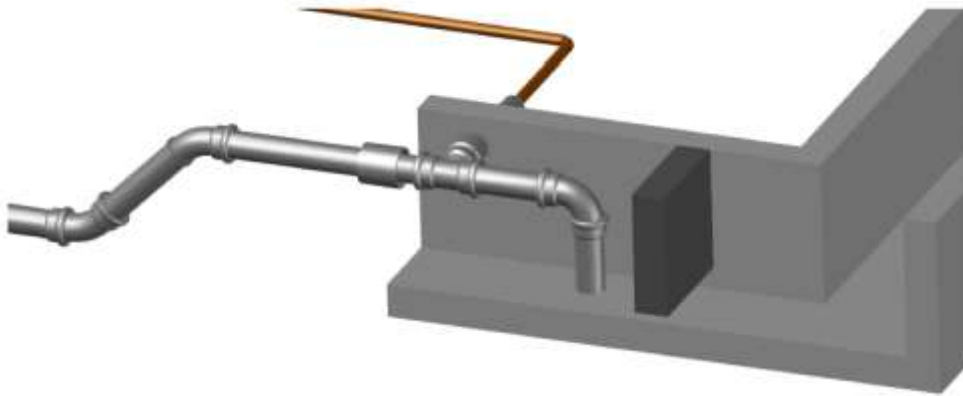


Figura 16. Esquema de cuba equalizadora de alimentación a biodigestores.

Cada biodigestor estará formado por dos mangas concéntricas de silobolsas de polietileno de alta densidad tricapa de 9 ft (2,74m) de diámetro con los extremos cerrados apretadamente sobre caños de 160 mm de diámetro conformando la entrada y la salida. La entrada estará constituida por un caño cribado suspendido sobre el fondo de las mangas por medio de caballetes con un largo total equivalente al 75% del largo total de la manga.

La salida tendrá una porción a 45° dentro del biodigestor para asegurar que el extremo esté siempre sumergido en la masa reaccionante de tal forma de evitar el escape de biogás por eventuales reducciones de nivel.

Los biodigestores estarán alojados en zanjas de contención de forma trapezoidal excavados en el terreno que proporcionarán integridad mecánica y geométrica aproximando la forma de los reactores a las de un cilindro. El volumen de las zanjas deberá ser equivalente al volumen hidráulico del reactor (VHR) (Figura 17).

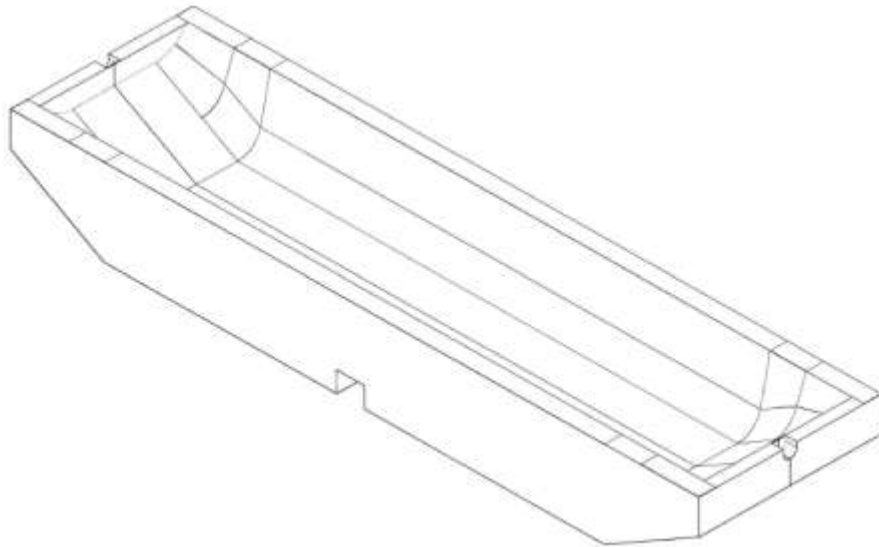


Figura 17 . Esquema de zanja de contención trapezoidal.

Los biodigestores tendrán incorporados los gasómetros como parte de la misma unidad funcional acumulando el gas producido en el proceso. El volumen del gasómetro (VG) será equivalente al 25% del volumen total de los biodigestores (VTR) para asegurar la acumulación de la producción diaria de biogás.

La salida de biogás estará ubicada en el centro de la parte superior de cada biodigestor conectándose por medio de una conducción flexible a la válvula de alivio, posteriormente al filtro de remoción de sulfuro de hidrógeno y luego a la línea de consumo.

Los biodigestores estarán conectados en su sección media inferior a una línea de recirculación que por medio de una bomba producirá la agitación y mezclado, la purga de lodos y eventualmente el reingreso de los lodos producidos al sistema en caso de presentarse la necesidad de reponer biomasa

bacteriana por alguna mala operación que afecte el funcionamiento o el rendimiento de la producción de biogás.

La salida del biol resultante será recibido en dos cubas de mampostería ubicadas en la salida de cada biodigestor (Figura 18) las que confluirán a un canal existente de hormigón para conducir los efluentes resultantes del sistema a la laguna de acumulación 1. Este efluente resultante estabilizado podrá ser aplicado directamente a campo como fertilizante orgánico.

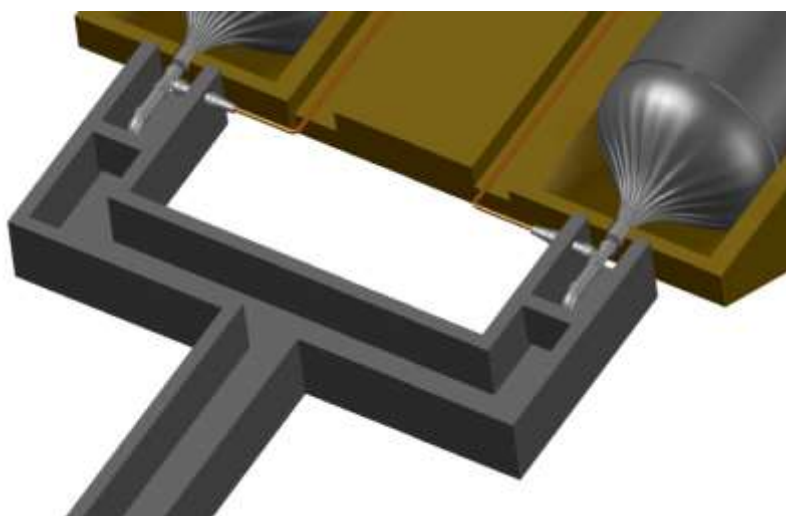


Figura 18. Esquema de cuba de salida de biodigestores.

En las secciones de abiertos que se emplearán para alimentar el sistema se deberá tener cuidado que no haya descargas de agua de lluvia en los mismos para evitar incrementos de la carga volumétrica del biodigestor, lo cual reduce el tiempo de retención hidráulico resultando en menor producción de biogás y olores en el biol de salida.

### **Cañerías y válvulas**

Las cañerías de entrada y salida a los biodigestores serán de PVC de 160 mm de diámetro, 3,2 mm de espesor de pared, y todas las cañerías serán pegadas con pegamento para PVC. Las cañerías y accesorios de la línea de



agitación y mezclado serán de polipropileno (PP) de 2 pulgadas de diámetro nominal con uniones roscadas y selladas con sellador para cañerías plásticas (Figura 19 y Tabla 35).

Las cañerías y accesorios de la línea de salida y conducción de biogás serán de polipropileno co-polímero Random (tipo3), PN20, termofusionables de 32 mm de diámetro nominal hasta la entrada del filtro de sulfuro de hidrógeno.

Los detalles de las cañerías de alimentación y salida se muestran en las Figuras 24 y 25.

En la salida del filtro de sulfuro de hidrógeno se realizará una reducción a 20 mm de diámetro nominal con el mismo tipo de cañería termofusionable para vincularse a las instalaciones de consumo. Se empleará este tipo de cañerías para minimizar pérdidas por eventuales fugas en las uniones que se presentan generalmente en las uniones roscadas. Además se eliminará el problema de corrosión en el interior de la conducción por la presencia de sulfuro de hidrógeno y vapor de agua.

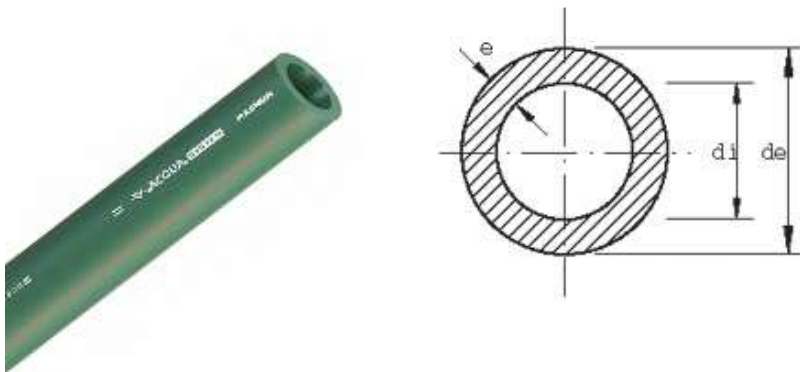


Figura 19. Especificación técnicas de las cañerías termofusionables (Acqua-System)

Tabla 35. Especificaciones técnicas para cañerías termofusionables para la línea de biogás. (fuente: <http://grupodema.com.ar/productos/tubo-acqua-system-r-magnum-pn20-acqua-system-101> , consultado 20-11-2020).

Especificación técnicas de las cañerías remofusionables Acqua-System

Descripción	Peso [kg/m]	Secc. int. [cm <sup>2</sup> ]	e [mm]	di [mm]	de [mm]	dn [mm]	PN [bar]
Caños A.S.Mag. PN 20 20mm	0,15	1,63	2,8	14,40	20	20	20
Caños A.S.Mag. PN 20 32mm	0,37	4,23	4,4	23,2	32	32	20

### Agitación de la mezcla:

La agitación de la mezcla reaccionante se realizará por medio de bomba centrífuga con un caudal adecuado para recircular el volumen del reactor en forma intermitente durante el día. La bomba seleccionada es del tipo centrífuga, autocebante de 1 HP, línea piscina, modelo Plata 4, con canasto para retener sólidos gruesos, caudal máximo 21.800 litros/hora, monofásica, marca pluviál (Figura 18).

De esta manera haciendo funcionar la bomba en ciclos de 3 horas durante el día se logrará la remezcla del contenido del reactor, mejorar el contacto sustrato-biomasa bacteriana, homogeneizar el contenido y lograr una mayor estabilidad térmica y minimizar los espacios muertos en el reactor.

Para la fijación de los intervalos de tiempo de parada de la bomba se realizará un estudio de velocidad de sedimentación de la mezcla reaccionante. De esta manera se puede determinar cuánto tiempo se puede mantener la mezcla sin agitación en el interior del reactor sin que se produzca la sedimentación total de sólidos, debido a que este límite operativo reduce la eficiencia en la producción de biogás.

Para la etapa de arranque se propone una agitación continua hasta la entrada en régimen del biodigestor.

Una vez que el proceso se haya estabilizado se deberá realizar el estudio de sedimentación y ajustar los intervalos de funcionamiento y parada de bomba de agitación. Esta propuesta se hace a los fines de optimizar el uso de energía exterior y mejorar el balance energético del sistema. El control de la bomba de agitación se realizará por medio de un tablero eléctrico con temporizador para asegurar tanto el funcionamiento como así también el tiempo de mezclado (Figura 20).



Figura 20. Bomba centrífuga para agitación de mezcla marca Fluvial.  
 (Fuente: <http://fluvial.com/productos/producto/67>, consultada 20/11/2017).

### Válvula de alivio o de seguridad de biogás:

La válvula de alivio es un componente imprescindible en el sistema de biodigestor. Es un elemento de construcción sencilla y su principio de funcionamiento consiste en realizar un sello hidráulico sobre una derivación libre de la conducción de salida del biogás de tal manera que la altura columna hidráulica, adoptada según el tipo de biodigestor, determine la presión de trabajo, es decir, la presión de la línea de consumo de biogás.

Cuando la presión en la línea alcanza la presión hidráulica de la columna se produce un escape de biogás para mantener la presión en el máximo prefijado según los requerimientos.

La válvula está compuesta por un accesorio tee instalada sobre la línea de conducción de gas con la derivación perpendicular al eje de la misma orientada hacia abajo sobre la que se acopla una porción de cañería de escape de ½ pulgada de diámetro con una longitud de aproximadamente 300 mm la cual se introduce en un recipiente con agua.

En el caso de biodigestores flexibles de polietileno la altura de la columna líquida en la que se sumerge la cañería de escape es de 120 a 150 mm (Marti Herrero J., 2019).

Inmediatamente aguas abajo de la válvula de alivio se colocará una válvula esférica como bloqueo de salida de biogás. En caso que esta válvula quede cerrada accidentalmente el gas escapará burbujeando en el recipiente que contiene la columna hidráulica. Se realizarán unas perforaciones de rebalse a la altura del nivel de líquido adoptado para facilitar el drenaje de agua en caso de entrada accidental por lluvias o por agregado excesivo de agua de reposición. De esta manera se evita un incremento indeseado de la presión de biogás de consumo.

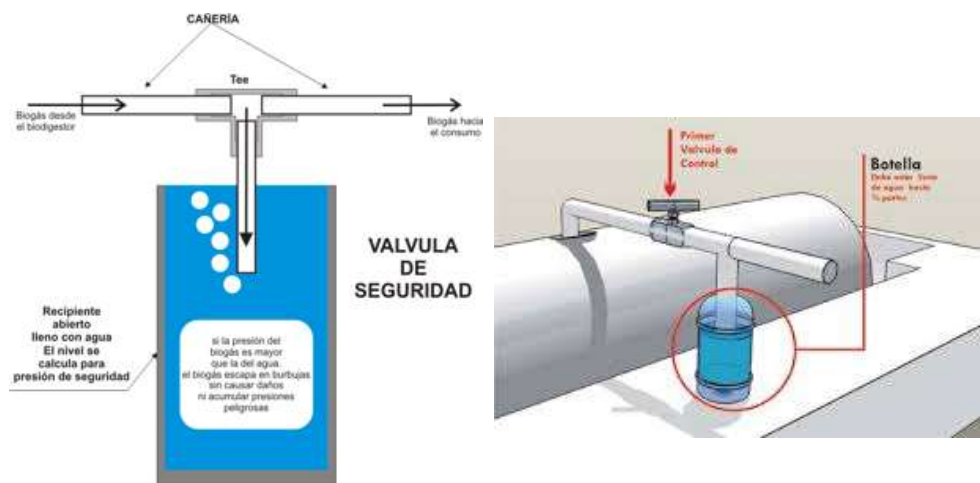


Figura 21. Esquema de válvula de seguridad de biogás. (imagen de internet <https://n1p1s2r2.wordpress.com/2009/09/15/valvula-de-seguridad/> , consultado 20-11-2020)

La conducción desde la brida de salida de biogás del biodigestor hasta la válvula de alivio tendrá una pendiente preferentemente hacia esta última para drenar condensaciones de vapor de agua que acompaña al gas haciendo que esta rebase por los orificios del recipiente de la válvula (Figura 21).

### **Filtro de retención de sulfuro de hidrógeno:**

El acondicionamiento del biogás consistirá en la eliminación del vapor de agua contenido en el mismo y del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) perjudicial para elementos metálicos en el circuito de conducción y consumo.

El  $H_2S$  se eliminará haciendo pasar el biogás por un filtro construido en caño de PVC de 160 mm de diámetro, espesor 3,2 mm y un 0,5 m de largo en forma de “Y” con tapas provistas de adaptadores roscados para vincularlos a la línea de conducción a la salida de los biodigestores. Llevará uniones dobles y válvulas esféricas plásticas en ambos extremos para desmontar fácilmente y reemplazar el material de relleno una vez saturado.

El material de relleno estará constituido por viruta media de hierro oxidada produciéndose las reacciones de óxido reducción descritas anteriormente. La oxidación de la viruta de hierro se realizará pulverizándola con vinagre 24 hs antes de ser empleada.

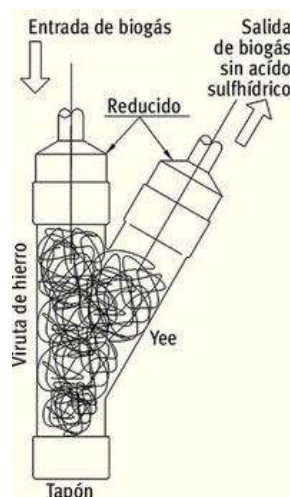


Figura 22. Esquema de filtro de retención de sulfuro de hidrógeno.

Al introducir la viruta en el tubo de PVC se deberá tener cuidado de no compactarla para mantener una buena superficie de contacto y reducir las pérdidas de carga (Figura 22).

El recambio del relleno del filtro se realizará inmediatamente cuando se detecta olor sulfhídrico (huevo podrido) en el punto de consumo.

En la Figura 23 se muestra el diagrama de flujos de proceso propuesto del sistema de biodigestores flexibles en paralelo para el tratamiento de purín de cerdo de las etapas de reproducción, maternidad y engorde en Establecimiento Ayala (La Ramada de Abajo – Tucumán, Argentina).

En la Figura 24 se muestra el detalle interno de biodigestor disposición de cañerías, y en la Figura 25, el detalle de cañerías de alimentación y salida de biodigestores.

El sistema de tratamiento planteado puede llevarse a una etapa más avanzada de diseño (Figuras 27 y 28) donde se muestra la incorporación de un equipo soplador para el biogás a la salida del filtro de sulfuro de hidrógeno y una antorcha de quemado sobre la línea de biogás. También se muestra una estructura de cobertura para proteger los biodigestores tanto de los rayos ultravioleta como de la caída de granizo o ramas que podrían dañar las mangas. A su vez esta estructura se usará para transformar la cobertura en un sistema solar pasivo de calentamiento por medio de film de polietileno traslúcido. De esta forma el efecto invernadero que se conseguirá que los biodigestores trabajen a una temperatura más elevada mejorando la conversión de sustrato en biogás para un mismo tiempo de residencia.

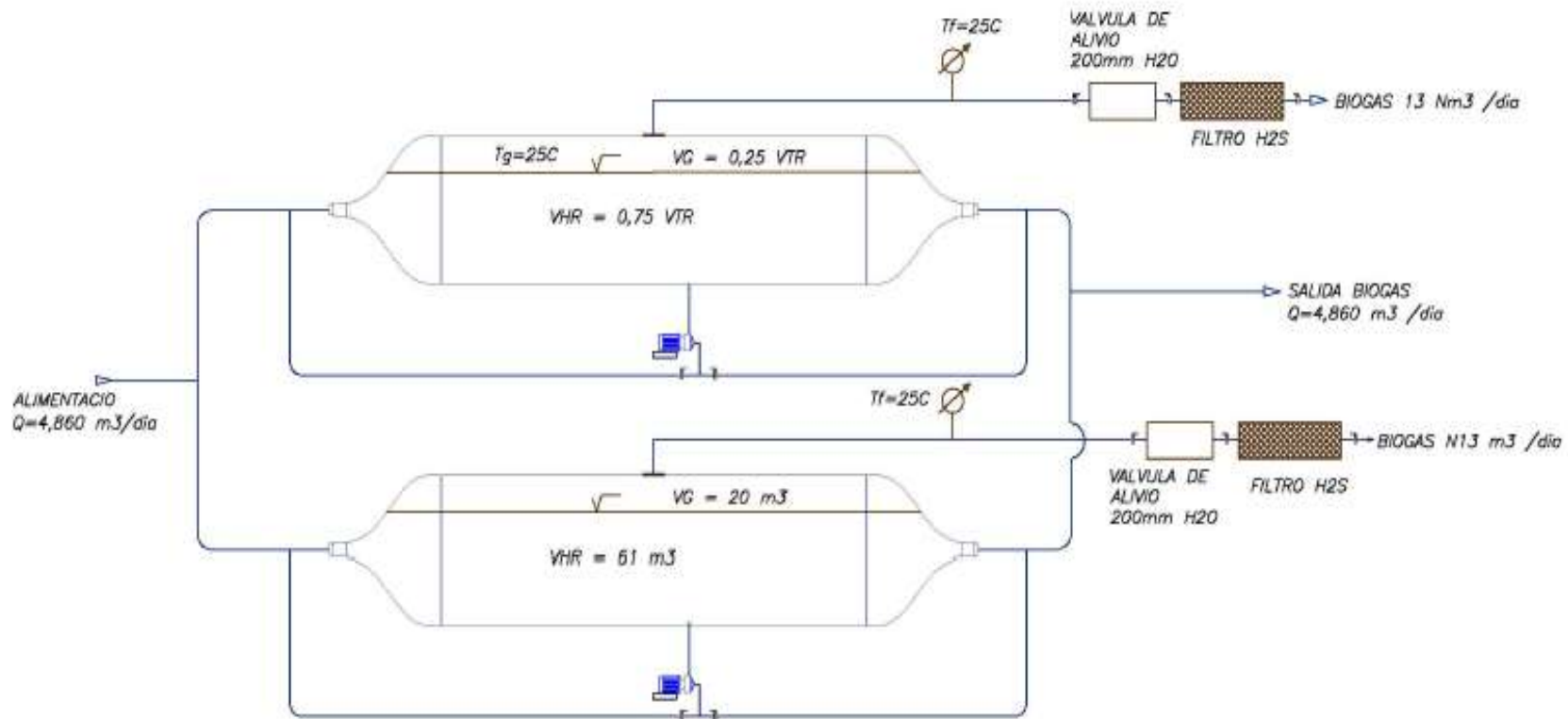


Figura 23. Diagrama de flujos propuesto. Biodigestores tubulares 1 y 2 en paralelo de 9 ft de diámetro

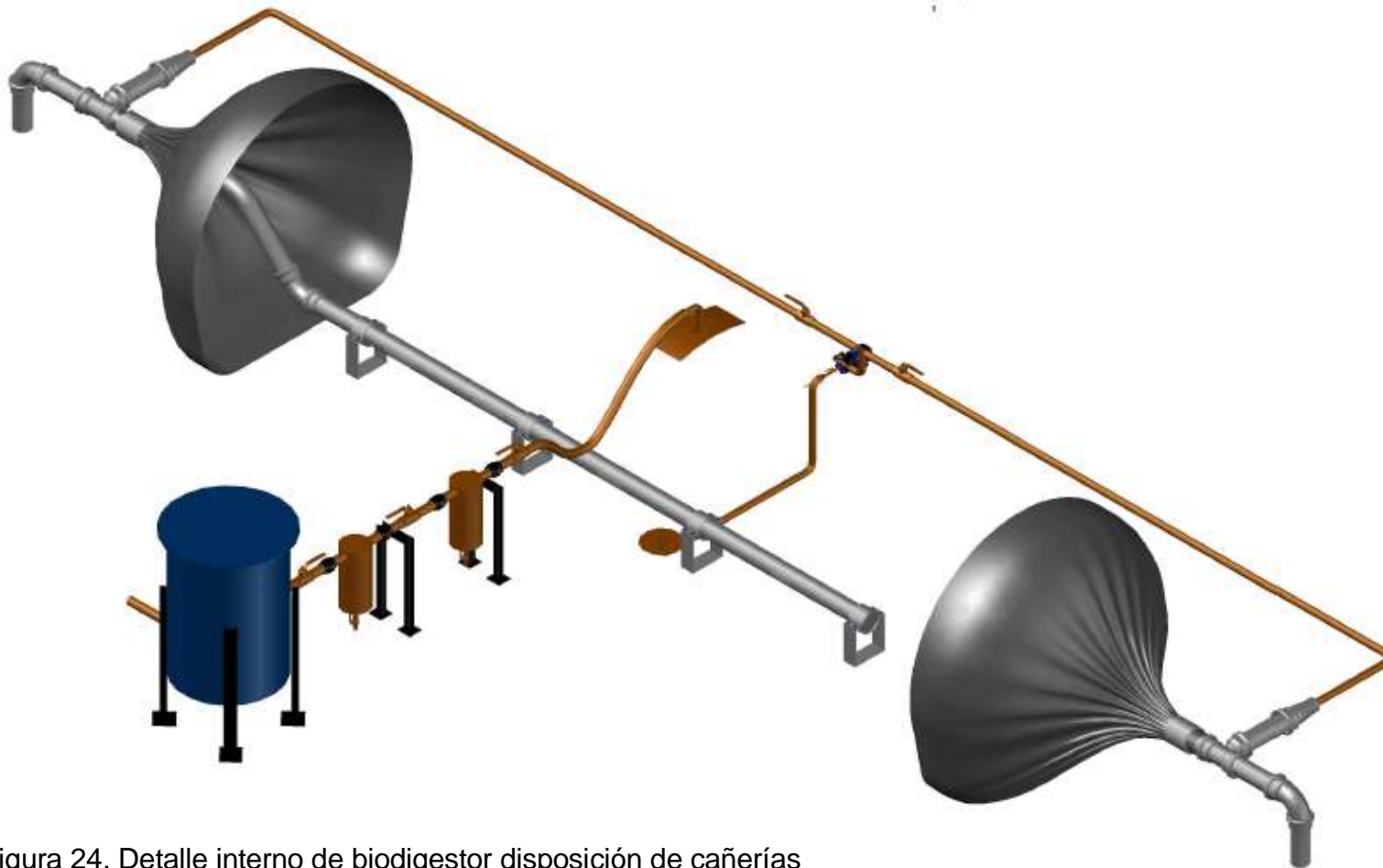


Figura 24. Detalle interno de biodigestor disposición de cañerías



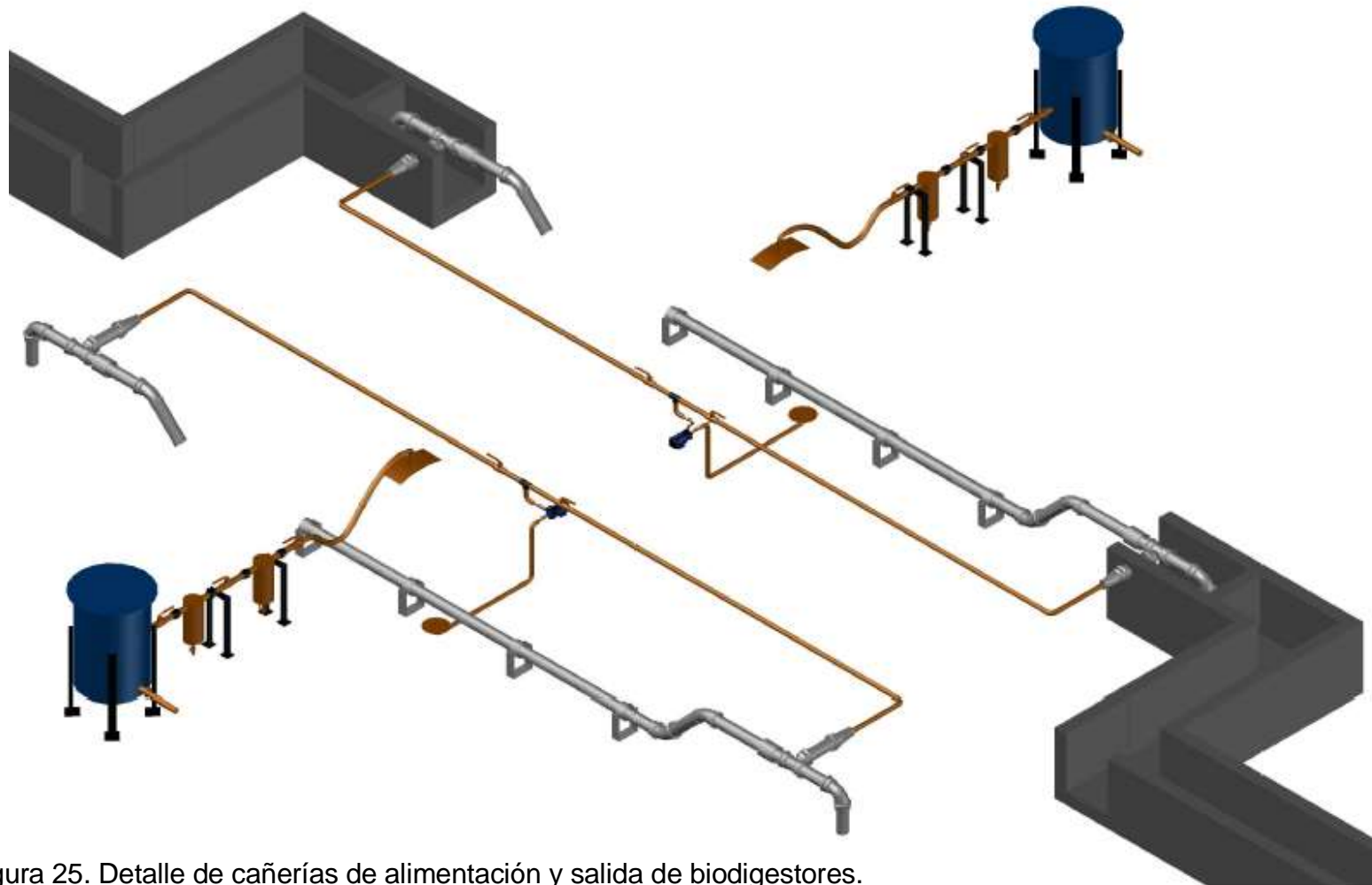


Figura 25. Detalle de cañerías de alimentación y salida de biodigestores.

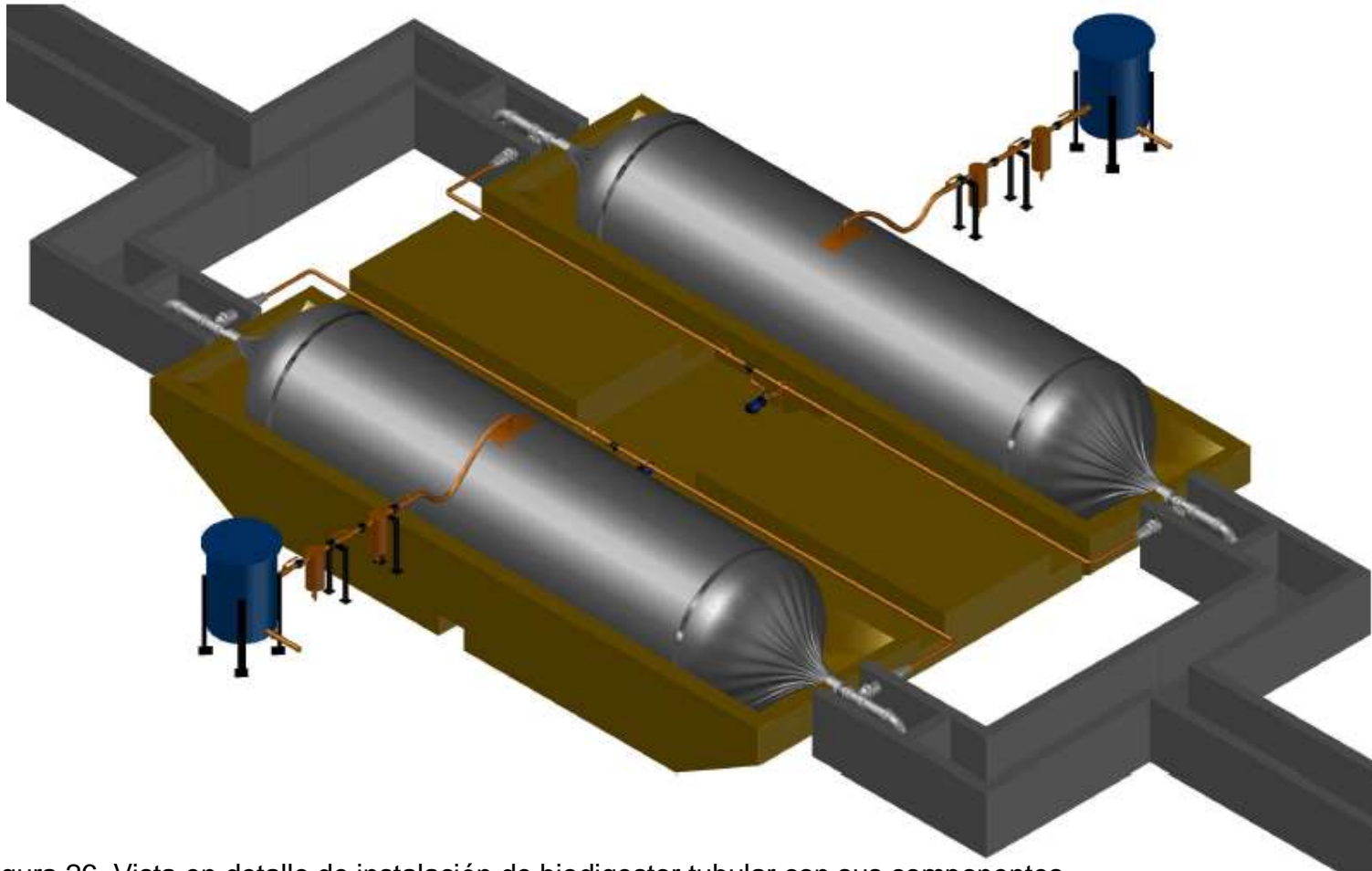


Figura 26. Vista en detalle de instalación de biodigestor tubular con sus componentes

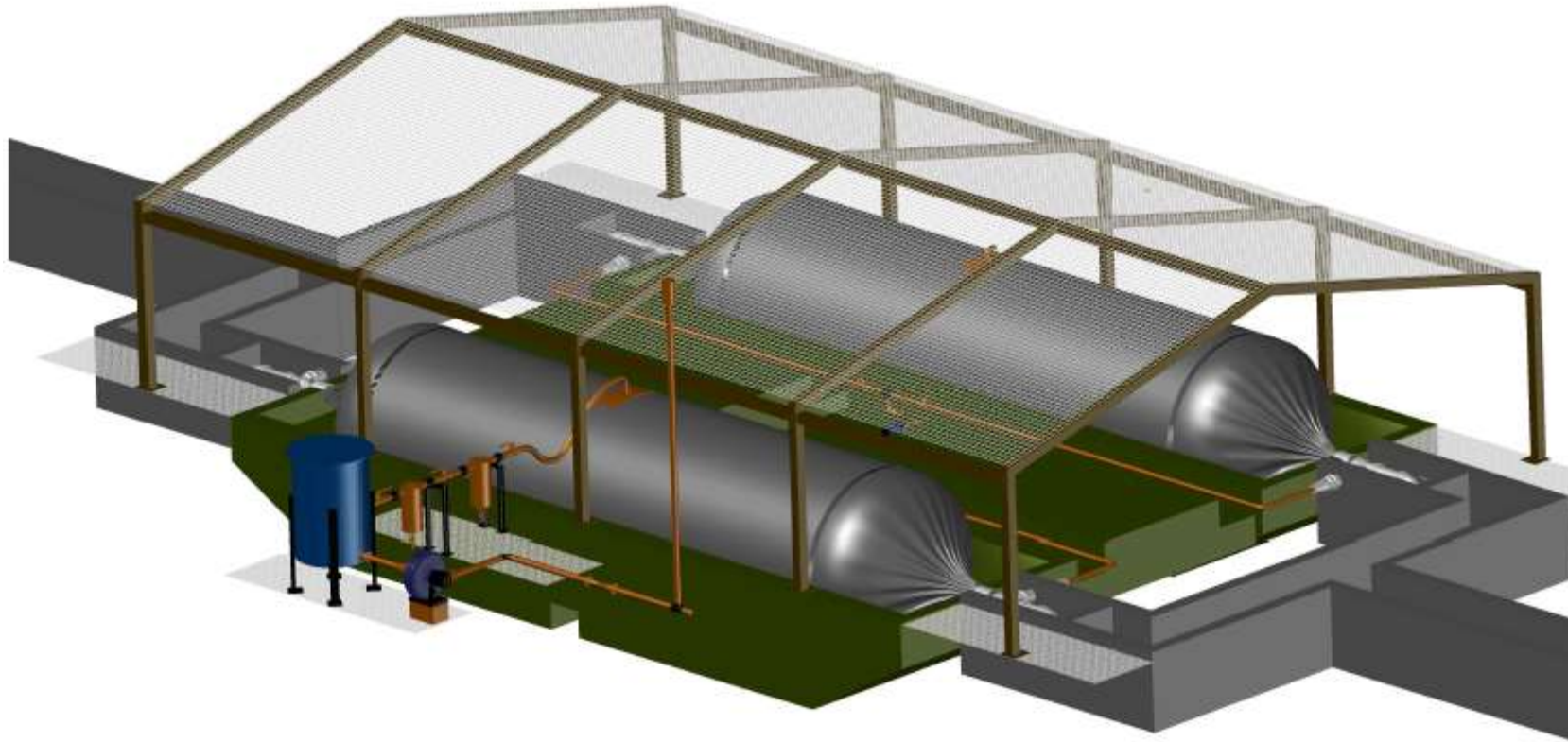


Figura 27. Vista en detalle de instalación de biodigestor tubular con cubierta protectora, soplador de biogás y antorcha de quemado.

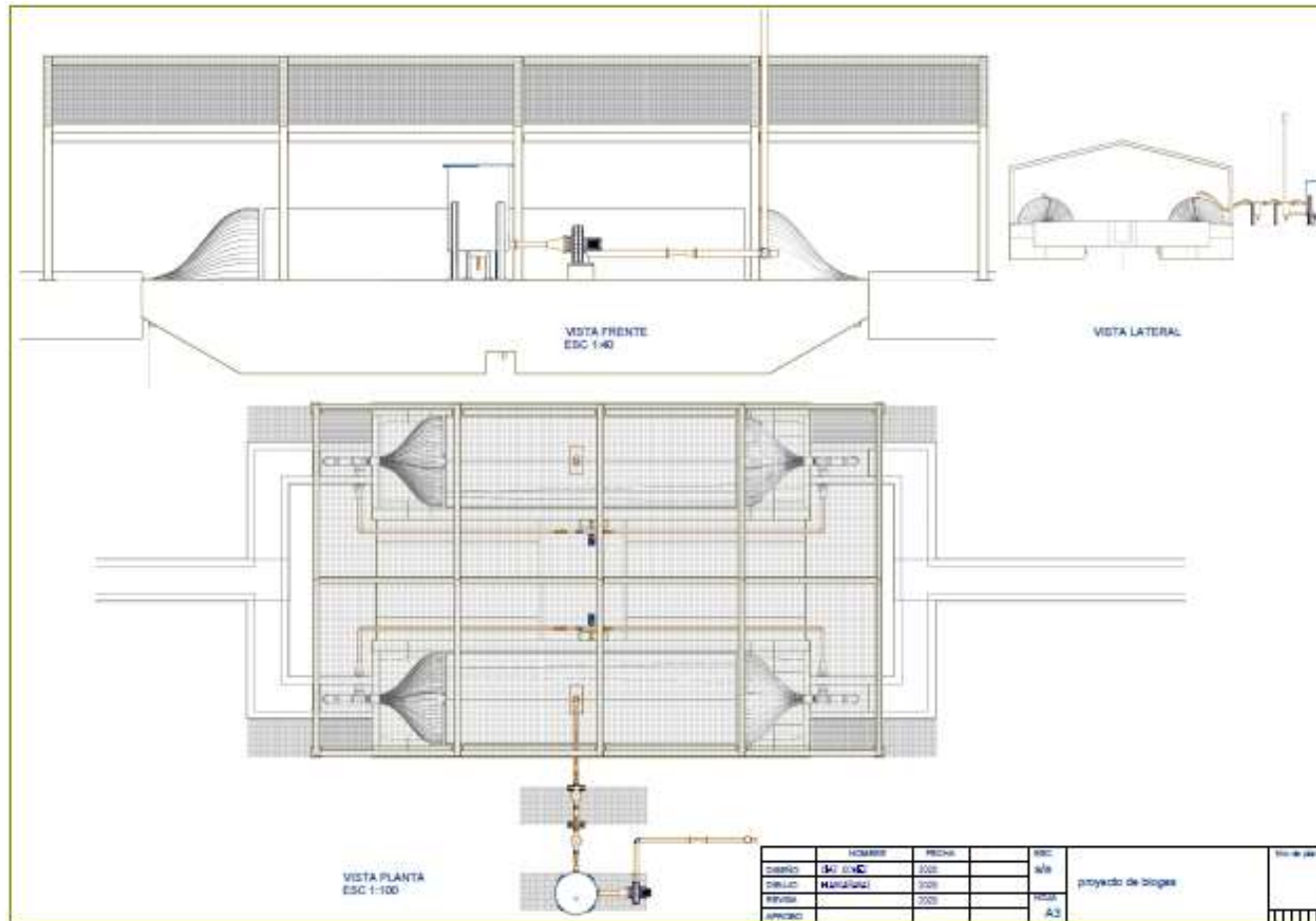


Figura 28. Plano de la instalación de tratamiento y generación de biogás con biodigestores tubulares en paralelo.

## **RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN DE BIODIGESTORES TUBULARES 1 Y 2.**

A continuación se presenta una serie de recomendaciones a tener en cuenta para la implementación del proyecto planteado para el tratamiento de los desechos porcinos.

Para la etapa de la instalación del o los biodigestores se procederá teniendo en cuenta aspectos como materiales de construcción, preparación del/os sitio/s donde se dispondrán los mismos, etc.

En cuanto a los materiales seleccionados normalmente se emplean las geomembranas de PVC o polietileno con espesores de entre 500 y 1500 micrones o las mangas de polietileno tricapa de alta densidad tipo silobolsas con espesores que van desde los 230 a 250 micrones. En este último caso se deberán usar mangas dobles concéntricas para construir cada biodigestor. Sería recomendable que la manga exterior se de vuelta para exponer su capa negra al ambiente de tal manera de mejorar la absorción de la radiación solar y así el intercambio de calor durante los días fríos manteniendo una buena temperatura interior del biodigestor lo que mejora los tiempos de retención y la conversión de la materia orgánica en biogás.

La vida útil de estos materiales depende en gran medida de la exposición a la radiación solar y a los cuidados que se tengan para preservarlos el mayor tiempo posible.

Cuando los materiales están expuestos a radiación solar muy intensa, los polímeros que conforman el plástico comenzarán a degradarse produciéndose la cristalización de la membrana en torno a los 3 años, mientras que si el mismo material se encuentra a la sombra o bajo cubierta su vida útil puede estar alrededor de los 10 años.

En los casos de exposición directa al sol en climas tropicales y subtropicales se recomienda colocar una cobertura tipo sábana negra de film de polietileno tipo invernadero que será la que se degrade para proteger la manga del biodigestor y de esta manera extender la vida útil. En el caso de climas fríos

la cobertura puede ser traslúcida tipo invernadero para proteger la manga del biodigestor y para proveer de calentamiento solar pasivo. Este sistema de calentamiento funciona si el biodigestor es de color oscuro de modo que absorba la radiación.

Las zanjas de contención podrían estar provistas de material aislante tanto en paredes como en el suelo de las mismas para reducir las pérdidas térmicas transferidas al suelo por encontrarse a menor temperatura. Los materiales orgánicos como la paja o las pasturas que son fácilmente disponibles en las instalaciones agrícolas no son recomendables debido a que se compactan en poco tiempo y se pudren perdiendo su capacidad aislante.

Otros materiales como las mantas del tipo lana mineral son poco recomendables porque se compactan mucho con el peso del mismo biodigestor y reducen su eficiencia aislante en forma significativa.

La espuma de poliestireno puede usarse con mejores resultados usando espesores de aproximadamente 5 cm. Presenta menor compactación que los anteriores y existe la alternativa de usar espuma de alta densidad que tiene mejores propiedades aislantes y una menor compactación por el peso. La desventaja que presenta está en que es un material muy voluminoso para el transporte y tanto más cuando los tamaños de los biodigestores son importantes por la superficie de piso y paredes de zanja a cubrir.

Se consideró que en el caso analizado no es necesaria la instalación de aislante en las zanjas de contención ni diseño solar pasivo debido a las características climáticas de la zona.

La instalación de cada biodigestor se realizará en tres etapas principales:

- Ubicación y cavado de la zanja de contención y construcción de las cubas ecualizadora de alimentación y cubas receptoras de salida.
  
- Instalación del biodigestor hasta la válvula de alivio de biogás.
  
- Instalación de línea de conducción de biogás hasta la salida del filtro de sulfuro de hidrógeno.

A continuación, se detallan estas etapas con las recomendaciones correspondientes y los criterios de diseño y montaje adoptados:

### **Ubicación y cavado de la zanja de contención y construcción de las cubas ecualizadora de alimentación y cubas receptoras de salida:**

Se realizará cerca del lugar de disponibilidad de los purines a tratar para facilitar la carga del sistema. Siempre que sea posible la carga deberá ser por gravedad para minimizar el uso de energía para el funcionamiento. Esto obliga a que el biodigestor esté por debajo del nivel de la salida de los corrales.

En regiones con temperaturas medias inferiores a 25°C es recomendable que las zanjas se ubiquen con orientación este-oeste de modo que reciba radiación solar la mayor parte del día.

Evitar las sombras de los árboles es importante para no tener caída de ramas que pueden producir la rotura de los biodigestores.

Se deberá evitar la ubicación de los biodigestores en zonas inundables aunque sea de pocos centímetros ya que puede producirse la flotación de los mismos con posible desacomodamiento en la zanja una vez que la inundación se evacue. De igual forma si se usaron aislantes entre la zanja y el biodigestor estos pueden desacomodarse o salirse y posteriormente será imposible volverlos a colocar.

Para realizar el cavado de la zanja se deberá marcar en el suelo la forma de la misma por medio de estacas e hilo o tanza. En el caso que la sección transversal de la zanja sea trapezoidal se deberá marcar el ancho inferior (a) y el ancho superior (b) procediéndose a cavar el ancho inferior hasta la profundidad de diseño (p) y posteriormente adecuar las paredes desde el ancho superior (b) hasta el inferior (a) lográndose la forma trapezoidal de la zanja. El fondo de la zanja deberá quedar a nivel (Figura 29).

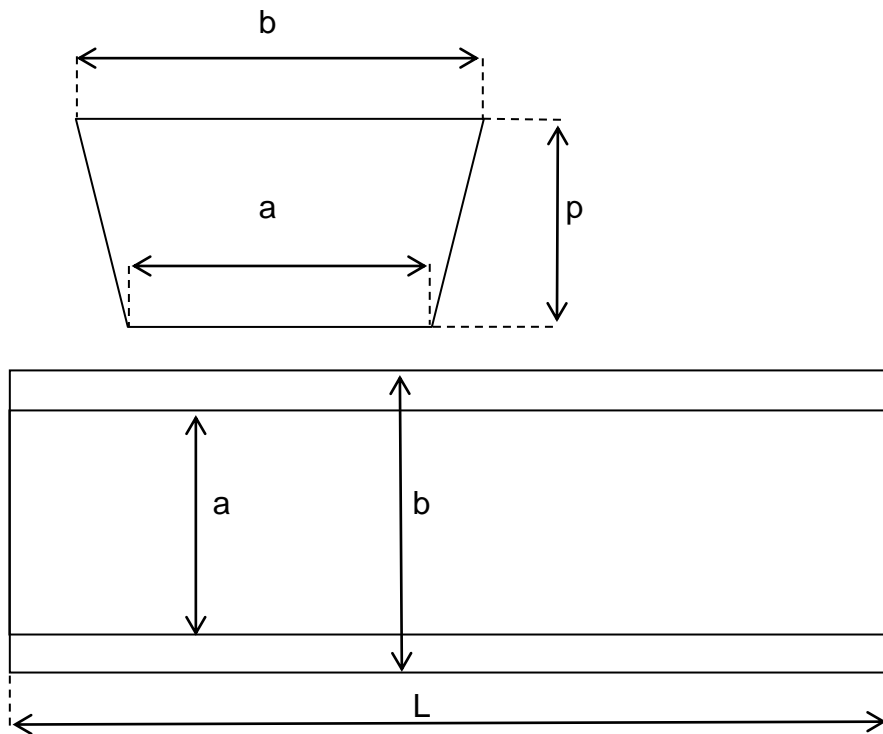


Figura 29. Esquema de dimensiones de zanja de contención de sección trapezoidal.

Una vez cavada la zanja se deberá dar terminación eliminando raíces y elementos extraños que puedan producir la rotura o penetración de la manga del biodigestor.

Se recomienda cubrir la superficie de las paredes y fondo de la zanja con una lámina plástica que podría ser un silobolsa usado abierto en forma longitudinal para proporcionar protección adicional a la pared del biodigestor en contacto con la zanja.

Construir las cubas de entrada y salida del biodigestor de acuerdo a las dimensiones predeterminadas en el diseño.

Por último abrir los canales de conexión entre la zanja y las cubas para la colocación de las cañerías correspondientes.



## **Instalación del biodigestor hasta la válvula de alivio de biogás.**

El primer paso consistirá en el montaje de la doble manga de silobolsa. Para ello se introducirá una manga dentro de la otra y posteriormente se colocarán las tuberías de alimentación, descarga, recirculación y la salida de biogás.

La operación se llevará a cabo en una superficie plana y libre de elementos que puedan producir daños en la pared de la manga (piedras y elementos cortopunzantes).

Se colocará una protección sobre la superficie donde se trabajará que podría ser un pedazo de silobolsa usado abierto longitudinalmente o una lona tipo cobertor de camión.

Se colocará el rollo de la manga sobre la protección y se extenderá una manga con una longitud determinada por la siguiente expresión:

$$\textit{largo de manga} = \textit{longitud de zanja (L)} + 1\textit{m} + \textit{profundidad zanja (p)}$$

Al extender la manga se deberá hacer sin arrastrar el rollo y teniendo cuidado de no producir roces sobre superficies ásperas con los dobleces que se forman en el manipuleo del plástico.

Antes de cortar la manga se deberá verificar que la sección seleccionada no presenta daños visibles.

La longitud excedente al largo de la zanja de contención se usará para que el biodigestor se acomode en la interior de la zanja y para el cierre de la manga sobre las tuberías de entrada y salida.

Cortada la primera manga se desenrollará una segunda manga sobre la primera, se deberá verificar nuevamente que no tenga daños visibles y se procederá al realizar el corte de una pieza de la misma longitud. Se recomienda realizar un trazado sobre la pieza a cortar para que el corte sea lo más parejo y prolijo posible.

Se recogerá la segunda manga cortada doblándola en pliegues desde un extremo.

La manga que quedó enterrada en el suelo se deberá ventear para lograr abrirla y así poder introducir en su interior la segunda manga que conformará la capa interna.

Dos personas deberán abrir la boca de lo que conformará la capa o manga exterior y una tercer persona (sin zapatos ni elementos que puedan caerse y causar daños en la pared de la manga exterior) introducirá la manga interior tomándola desde un extremo y arrastrándola poco a poco y cuidadosamente a través de la manga exterior hasta salir por el extremo opuesto.

Se deberán acomodar ambas mangas para eliminar dobleces o pliegues en las paredes. Para ello se deberá sujetar las bocas de la capa externa manteniendo extendida la manga mientras se tira de ambos extremos de la capa interna hacia un extremo y luego hacia el otro hasta que ambas mangas queden acomodadas una dentro de la otra sin pliegues ni arrugas.

Posteriormente se deberá ubicar la salida de biogás en la parte superior de la manga donde se formará la cámara de gas. La ubicación longitudinal no es determinante. En este caso se ubicará la salida en el punto medio de la longitud de las mangas. Se recomienda trazar con un marcador la posición donde se practicará la perforación para la conexión de salida. Para ello se empleará una brida de descarga de tanque de agua en polipropileno de 1 pulgada de diámetro nominal como accesorio de conexión entre el biodigestor y la línea de biogás (Figura 30).

Para poder colocar dicha brida se deberá practicar una perforación de guía en ambas paredes de las mangas y posteriormente se realizará desde adentro de las mangas un orificio con un diámetro lo suficientemente ajustado como para que atravesase el macho de la brida de conexión.



Figura 30. Brida de conexión de polipropileno para salida de biogás

Se reforzará la zona de penetración de la brida con dos ponchos cuadrados de 300 x 300 mm perforados en el centro para pasaje del macho de la brida del mismo material de las mangas que podrán pegarse con sellador siliconado sobre la superficie exterior de la manga externa y sobre la superficie interior de la manga interna. Para mejorar la hermeticidad del cierre se colocará dos arandelas de 200mm de diámetro de goma que podrán obtenerse de cámaras en desuso de rueda de vehículos. Estas arandelas también estarán perforadas en forma centrada con un diámetro de orificio tal que permita el pasaje apretado del macho de la brida.

El accesorio se colocará desde adentro hacia afuera para lo cual una persona deberá introducirse por la manga interna y colocar la brida, las arandelas y los ponchos de refuerzo.

La secuencia de colocación de la brida de salida deberá ser:

- Macho de brida
- Arandela de PVC que forma parte de la brida
- Arandela de goma de 200 mm de diámetro
- Poncho de refuerzo interior pegado con sellador siliconado.
- Poncho de refuerzo exterior pegado con sellador siliconado.
- Arandela de goma de 200 mm de diámetro
- Arandela de PVC que forma parte de la brida
- Hembra de brida

Una vez realizada esta secuencia de colocación de la salida de biogás se procederá a realizar el ajuste de la tuerca o hembra proporcionándole el mayor ajuste manual. Se evitará el uso de herramientas que puedan dañar el accesorio de polipropileno o la pared del biodigestor.

A partir de este punto se continuará con la línea de salida de biogás hasta la válvula de alivio.

Igual procedimiento deberá emplearse para la colocación de la salida de recirculación en la parte inferior de las mangas, esta deberá ir en la misma posición longitudinal que la salida de gas pero en la parte inferior.

Para ello se emplearán accesorios tipo brida de descarga en polipropileno para tanques pero de un diámetro de 1 1/2 pulgadas nominal teniendo en cuenta que por estas conducciones circularán una mezcla líquida con presencia de lodos.

La secuencia de armado de las salidas de recirculación es idéntica a la descrita para la salida de gas usando los mismos componentes.

Una vez colocadas las salidas de recirculación se deberá armar la cañería correspondiente empleando caños de polipropileno roscado de 1 1/2 pulgadas de diámetro nominal, embutiéndola en las canalizaciones previstas en la zanja de contención. Se debe tener la precaución de realizar un buen sellado de las uniones roscadas para evitar pérdidas.

Armar la cañería de recirculación terminando en una unión doble antes de la conexión de la bomba de recirculación.

El último paso en el armado de los biodigestores es la colocación de las cañerías de alimentación purines y salida de biol.

Para ello se emplearán cañerías de PVC de 160mm de diámetro con sus correspondientes accesorios.

La entrada y la salida se harán con una porción de caño de 1500 mm de largo

Se empezará colocando la entrada introduciendo 800 mm de caño en el interior de la doble manga de los cuales 300mm quedan dentro del biodigestor y los 500 mm restantes servirán para el cierre con la manga doble. Para ello se deberán emplear bandas de goma de neumático de aproximadamente 50 mm de ancho.

Antes de realizar el cierre de las mangas sobre la cañería de entrada se procederá al ensamble el tubo de distribución interior.

Sobre la porción de 300 mm se deberá pegar un codo de 45° orientado hacia la parte inferior del biodigestor, seguido de una porción de caño recto de aproximadamente 1100mm seguido de otro codo a 45° cuyo extremo libre quede paralelo al fondo del biodigestor.

Una opción para mejorar la distribución y la mezcla de la alimentación dentro de la manga del biodigestor es acoplar al extremo libre del segundo codo de 45° un caño cribado de una longitud equivalente al 75% del largo total del biodigestor con perforaciones realizadas con mecha copa de 2pulgadas de diámetro a lo largo del tubo separadas 200 mm entre centro y centro de orificio.

Esta configuración permitirá una mezcla más homogénea a lo largo de las mangas.

El extremo del caño cribado deberá llevar una tapa pegada para lograr que la alimentación drene por las perforaciones de la criba descargando en todas direcciones.

El caño cribado deberá montarse sobre caballetes en forma de media caña donde asienta el caño y con sus bases apoyadas sobre porciones cuadradas de 500 por 500 mm de goma de neumático para evitar que se dañe la parte inferior del biodigestor.

Una vez armado el conducto de alimentación se procederá al cierre de la boca de entrada.

Realizar una marca a 500 mm del borde sobre el extremo de la manga que cerrará sobre el caño de entrada ya que esta será la porción de manga que quedará realizando el cierre sobre el caño.

Realizar pliegues de aproximadamente 150 a 200 mm de ancho doblando los laterales de la manga en forma de fuelle con un desarrollo de un par de metros a lo largo de la manga hasta apretar la manga contra la cañería. En este momento se debe comenzar a cerrar apretadamente la manga empleando las bandas de goma comenzando de adentro hacia afuera iniciando en la marca realizada sobre la manga, pasando cada vuelta de banda sobre la vuelta anterior hasta cubrir los 500mm de borde y avanzar entre 100 y 200 mm más para reforzar el cierre.

Por último se deberá proceder a la instalación de la tubería de salida. Está estará conformada por una porción de caño de 1500 mm de largo y 160mm de diámetro que se introducirá 800 mm dentro de la manga usándose 500mm. Sobre la porción de 300 mm se deberá pegar un codo de 45° orientado hacia la parte inferior del biodigestor, seguido de una porción de caño recto de aproximadamente 1100mm. Se deberá tener la precaución de flamear los bordes del caño que quedará en el interior de la manga para redondearlos y así evitar que pueda dañar la pared interna del biodigestor.

Este caño de salida se deberá encajar en la cavidad prevista en la zanja de contención para descargar en las cubas de salida.

El procedimiento de cierre es idéntico al que se describió para la cañería de alimentación.

De esta forma queda armado el biodigestor. Los pasos siguientes corresponderán al montaje de la línea de captación de biogás, recirculaciones y conexiones de bombas.

### **Instalación de línea de conducción de biogás hasta la salida del filtro de sulfuro de hidrógeno.**

Una vez montado el biodigestor se procederá a vincular la salida de biogás a la válvula de alivio. Para ello se colocará una curva roscada en la brida de salida de biogás, seguidamente una espiga enroscada en la boca libre de la curva y se conectará a la entrada de la válvula de alivio por medio de una manguera flexible con ambos extremos asegurados por abrazaderas metálicas del tipo cremallera.

La función de la manguera es amortiguar los movimientos de la cámara de gas del biodigestor debido a las expansiones y contracciones de la producción y consumo de biogás así como por cambios de temperatura durante el día.

## **Inflado y llenado de los biodigestores previo al llenado líquido.**

Una vez instalado el biodigestor en la zanja de contención (Figura 29) con todas sus conexiones se deberá proceder al inflado para lograr el correcto acomodamiento y la eliminación de la mayor cantidad de pliegues y arrugas.

Se deberán cerrar la válvula de salida de biogás y la válvula de entrada de recirculación a la bomba correspondiente.

Por otra parte se tapan las bocas de entrada y salida del biodigestor con una porción doble de pedazo de silobolsa y se procede a atarlos firmemente con bandas de goma.

Desconectar la línea de recirculación en el empalme con la cañería de entrada e introducir por el empalme el pico de un soplador tipo barre hojas y proceder al inflado del biodigestor.

Una vez realizada esta operación se retirará rápidamente el pico del soplador y se empalmará la cañería de recirculación.

Con el biodigestor inflado se comienza a alimentar. Para ello se deberá llevar a nivel la cuba ecualizadora de alimentación hasta tapar la boca de la cañería de entrada, se deberá sacar la obstrucción colocada previamente dejando que comience el llenado. Unos minutos después se deberá abrir la válvula de salida de biogás para permitir que el aire comience a escapar por la válvula de seguridad a medida que va siendo desplazado por el líquido entrante.

Cuando el nivel interno del biodigestor es lo suficientemente alto como tapar el extremo libre del caño de salida se quitará la tapa de silobolsa de la cañería de salida hasta que empiece el rebalse. En estas condiciones el biodigestor comenzará a entrar en operación. El biodigestor instalado quedará como se indica en la Figuras 31 y 32.

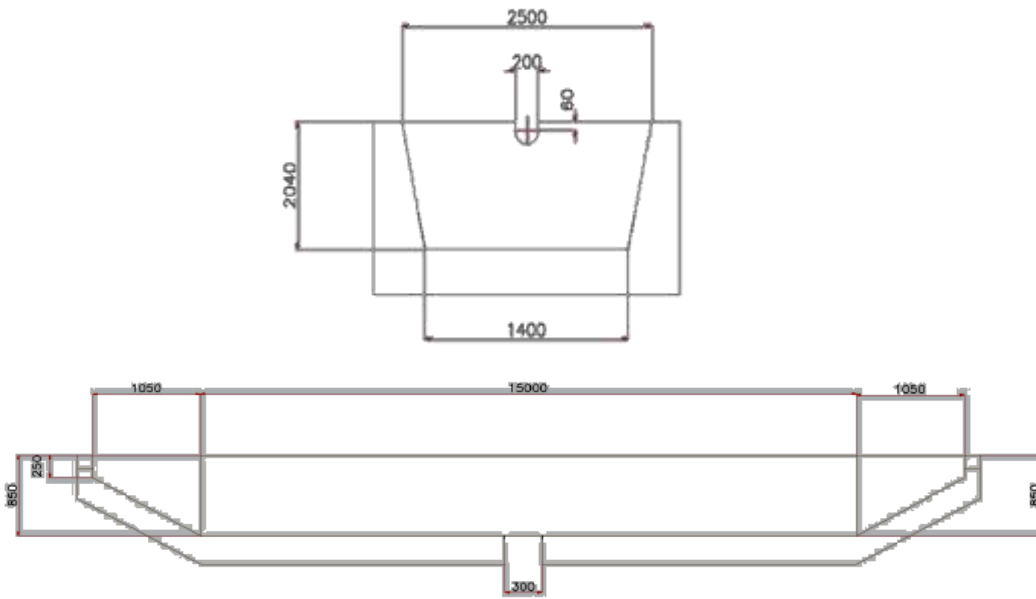


Figura 31. Dimensiones principales de zanja en función del tamaño del biodigestor.



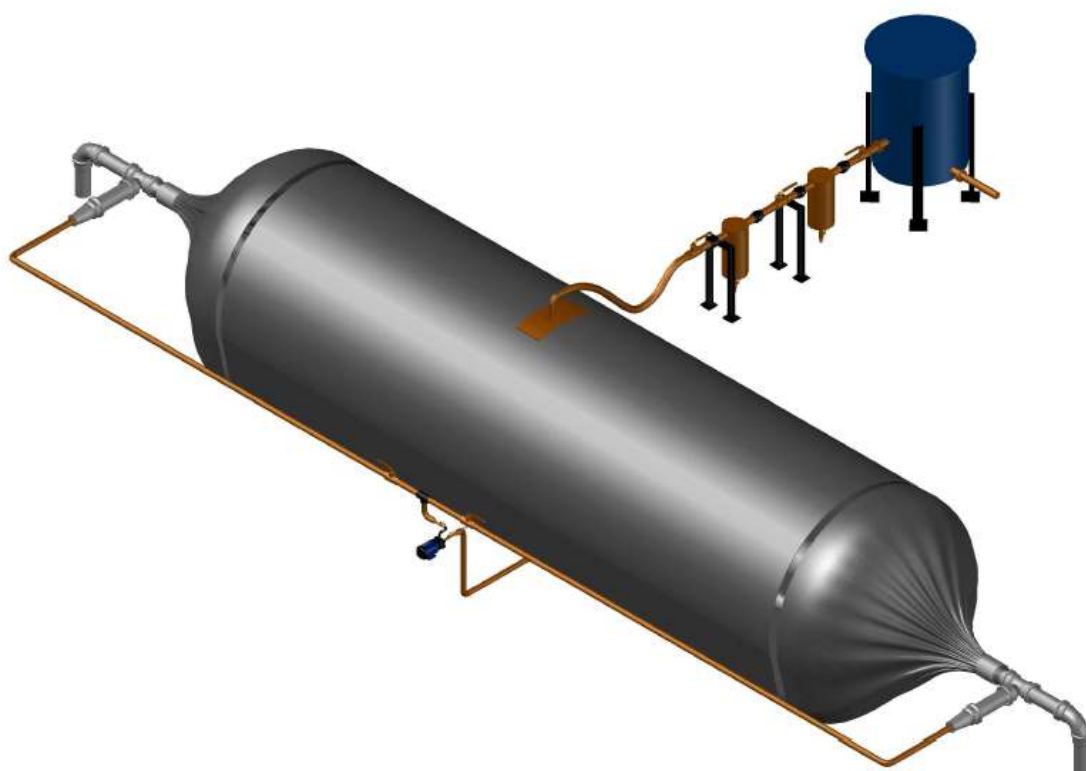


Figura 32. Esquema básico de todos los componentes que conforman un biodigestor tubular.

## COMPARATIVA DE IMPACTOS AMBIENTALES DEL PROYECTO

Del análisis de actividades del proyecto se identificaron oportunamente tres impactos negativos, dentro de las categorías Recursos Hídricos, Riesgos Naturales y Riesgos Antrópicos. Analizando cada rubro detallado en el grupo, se puede decir:

- Recursos Hídricos: indicó la posibilidad de incidir en la calidad de las aguas subterráneas (calificado de intensidad baja y magnitud baja) debido a los desechos manejados inadecuadamente.
- Riesgos Naturales: el efecto negativo está relacionado con la posibilidad de contaminación del suelo (intensidad media, magnitud baja) por el manejo inadecuado de excretas.
- Riesgos Antrópicos: calificado con intensidad media y magnitud baja, se refiere a la posibilidad de modificación de la calidad del aire debido a los olores provocados por el potencial manejo inadecuado de los desechos.

En el momento de estudio, los desechos de la granja porcina se almacenaban en lagunas de acumulación produciendo los tres impactos negativos mencionados.

Con la implementación del sistema propuesto de tratamiento de desechos por medio de los biodigestores, se busca actuar directamente sobre los impactos negativos en los rubros mencionados revirtiendo su carácter negativo.

El impacto sobre los recursos hídricos desaparecerá debido a que el biol de salida de los biodigestores estará estabilizado y podrá aplicarse directamente a campo con un mínimo de carga orgánica con lo cual el rubro de Riesgos Naturales también se transforma en neutro.

La generación de olores que puede cambiar la calidad del aire circundante al proyecto produciendo un impacto negativo en el rubro Riesgos Antrópicos disminuirá o desaparecerá debido a que el biol resultante de los desechos bien tratados no tiene olor. Por otra parte el estudio de impacto ambiental no menciona la modificación de la calidad del aire debido al metano producido por la

degradación que se produce en las lagunas de acumulación el cual es venteado descontroladamente al medio ambiente.

Con la implementación del sistema de biodigestores este impacto no mencionado en el estudio de origen también disminuirá significativamente o desaparecerá ya que la producción de metano contenido en el biogás es captado y empleado generando CO<sub>2</sub> y vapor de agua en la quema.

En las Tablas 36 y 37 pueden verse las comparaciones de impactos ambientales sin biodigestores y con el sistema de biodigestores implementados.

Tabla 36. Resumen de impactos ambientales sin biodigestores (Salas H., 2009).

<b>Categoría</b>	<b>Impacto</b>	<b>Signo</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Ecosistemas</b>	N			
<b>Recursos hídricos</b>	1S	-	B	B
<b>Drenaje</b>	N			
<b>Riesgos naturales</b>	1S	-	M	B
<b>Riesgos antrópicos</b>	1S	-	M	B
<b>Uso del suelo</b>	1S	+	B	B
<b>Aspectos socioeconómicos</b>	4S	+	MBBB	MBBB
<b>Paisaje</b>	2S	+	AB	AB
<b>Otros</b>	2S	+	AM	AM

Tabla 37. Resumen de impactos ambientales con la implementación del sistema de biodigestores:

<b>Categoría</b>	<b>Impacto</b>	<b>Signo</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Ecosistemas</b>	N			
<b>Recursos hídricos</b>	N			
<b>Drenaje</b>	N			
<b>Riesgos naturales</b>	N			
<b>Riesgos antrópicos</b>	N			
<b>Uso del suelo</b>	1S	+	B	B
<b>Aspectos socioeconómicos</b>	4S	+	MBBB	MBBB
<b>Paisaje</b>	2S	+	AB	AB
<b>Otros</b>	2S	+	AM	AM

Las referencias de lectura de la tabla de identificación y evaluación de los impactos ambientales se describen en la Tabla 38.

Tabla 38. Referencias de identificación y evaluación de impactos ambientales (Salas H., 2009)

<b>Proyecto</b>	<b>Impacto</b>	<b>Signo del impacto</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Magnitud</b>
Granja de cerdos	S/N	+/-	A/M/B	A/M/B

- Impacto (im): identificación de efecto significativo de acciones del proyecto. Signo del impacto: (+): efecto positivo sobre el medioambiente; (-): efecto negativo sobre el medioambiente
- S: si afecta ; N: No afecta
- Intensidad: severidad de un impacto en función del grado de modificación de la calidad ambiental. Categorías cualitativas:  
A= alta  
M= media  
B= baja
- Magnitud: área de afectación del impacto. Categorías cualitativas:

A= alta, afecta al área de influencia definida para el proyecto.

M= media, afecta un área menor del área de influencia definida para el proyecto.

B= baja, el efecto está circunscripto a un espacio puntual.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las actividades realizadas en el trabajo de tesis, podemos concluir que:

- El empleo de biodigestores tubulares flexibles para tratar efluentes de emprendimientos de producción porcina de ciclo completo en corral ubicados en zonas de clima subtropical es una alternativa viable, práctica, de bajo nivel de mantenimiento, relativamente económica en comparación con otros tipos de instalaciones y flexibles desde el punto de vista de su ampliación o reducción de capacidad por instalación de digestores en paralelo con un empleo de superficie reducida.
- Las condiciones ambientales de la zona propuesta son buenas para la implementación de este tipo de tecnología. Las temperaturas medias se encuentran en el rango mesofílico aunque muy cerca del límite de empleo de sistema de calefacción solar pasiva. No se consideró el empleo de calefacción solar pasiva debido a que si bien las temperaturas medias pueden descender por debajo de los 15°C en las estaciones otoño – invierno, la duración temporal de estas bajas temperaturas no se mantienen por un periodo de tiempo prolongado.
- Las características de los purines a tratar fueron adecuadas para ser empleadas como alimentación en el biodigestor, aunque presentaron algunos parámetros con valores por debajo de los que podrían esperar para los desechos porcinos. Estos valores podrían deberse a un exceso en el empleo de agua de lavado y/ o de uso general, como también a un proceso de reacción que comienza en las fosas ubicadas debajo de los corrales acompañado de un efecto de sedimentación de sólidos. Los efluentes resultantes de los corrales poseen actividad metanogénica específica (AME), es decir, ya contienen bacterias capaces de comenzar el proceso de estabilización de materia orgánica desde que la mezcla de purín y agua se juntan en las fosas debajo de los corrales con la consiguiente producción de biogás que se pierde por no realizarse la captación del mismo en ese punto.

- Esta actividad metanogénica tiene la gran ventaja de permitir la alimentación al sistema de tratamiento sin necesidad de inoculación, lo que permitiría que los biodigestores alcancen un funcionamiento estable en un periodo de tiempo relativamente corto.
- Se estima que la carga orgánica expresada como DQO se reduce en aproximadamente un 72%, lo que representa un importante impacto ambiental positivo comparado con lo que se produce al realizar el vuelco a laguna de sacrificio (efluente sin tratamiento).
- La producción y captación de biogás en los biodigestores reduce el impacto en el aire evitándose el venteo descontrolado producido en las lagunas de acumulación existentes.
- Los lodos resultantes del proceso pueden ser empleados como relleno o como fertilizante aplicando directamente a campo, reduciendo el empleo de fertilizantes de origen industrial derivados del gas natural.
- Para la aplicabilidad de los biodigestores tubulares flexibles se restringió al tratamiento de los purines provenientes de las etapas de reproducción, maternidad y engorde, para lo que se empleó dos reactores en paralelo constituidos por mangas concéntricas dobles de silobolsa de polietileno tricapa de alta densidad de 9 ft de diámetro para los cuales los parámetros dimensionales como la relación Longitud/Diámetro (L/D) se encontraba dentro del rango recomendable para permitir una buena mezcla interior y asegurar que la masa reaccionante permanezca el tiempo de retención hidráulico establecido.
- Se descartó la posibilidad de empleo de este tipo de biodigestores para el tratamiento de los purines de la etapa de recría debido a que la relación longitud/diámetro era muy chica tanto para mangas de silobolsa de 6 ft y 9 ft de diámetro, y además se encontraba fuera del rango recomendable para una buena operación. El inconveniente que se detectó es que la entrada y la salida del reactor quedan muy cercanas entre sí lo que llevaría a que una gran parte de la alimentación atravesase el sistema sin permanecer el tiempo de retención hidráulico necesario para lograr una buena estabilización de la

materia orgánica, y pudiendo obtenerse un bajo rendimiento en la producción de biogás, con un mayor impacto ambiental. Se recomienda estudiar la posibilidad de un biodigestor tipo tanque agitado donde la mezcla y el tiempo de retención pueden controlarse mejor.

- No se consideró la posibilidad de bombeo de los purines de recría para un tratamiento integral en conjunto con los de las otras etapas por una cuestión de minimización de uso de energía para los movimientos de fluidos y así maximizar el aprovechamiento del biogás producido.
- La cantidad de biogás en ambos biodigestores instalados en paralelo en las etapas de reproducción, maternidad y engorde equivalió aproximadamente a 15,4 m<sup>3</sup>/día de gas natural, los cuáles pueden ser empleados para calefaccionar los corrales de la etapa de maternidad durante los meses de baja temperatura ambiente, emplearse para el secado de granos para la alimentación de los cerdos, en tareas domésticas para cocinar, calentar agua o bien para ser quemados en un grupo electrógeno para producir electricidad. Cualquiera sea el uso aplicado al biogás representaría un ahorro energético proveniente de otras energías convencionales como el gas natural, el gas envasado, electricidad de la red de distribución, nafta empleada en grupos electrógenos, etc.
- Este tipo de sistemas presenta la ventaja de ser fácilmente desmontable y desarmable requiriendo de un gasto mínimo de acondicionamiento de suelo para emplearlo con otros fines.
- Los biodigestores flexibles serían una excelente alternativa para emprendimientos medianos a chicos de cría porcina en corral donde la captación de los desechos puede hacerse prácticamente en un 100%.
- La inversión inicial no es elevada, son fáciles de mantener y operar, producen ahorro de energía y reducen los impactos ambientales asociados al manejo de los desechos.



## REFERENCIAS

- Acosta L., Abreu C. La Digestión Anaeróbica. Aspectos Teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, N° 1, 2005.
- Acosta Sosa M. Instalaciones porcinas orientadas al pequeño y mediano productor del NEA y NOA, Ediciones INTA, 2018, Archivo Digital con descarga Online; ISBN 987-987-521-893-2.
- Baird R.B. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. American Water Works Association (AWWA, WEF and APHA), 2017.
- Berra G., Finster L. Emisión de gases de efecto invernadero; influencia de la ganadería argentina; Instituto de Patobiología, I.N.T.A. Castelar; 2002.
- CONINAGRO (Confederación Intercooperativa Agropecuaria), Área de economía de CONINAGRO, Informe Técnico N°6, Economías Regionales: Porcinos, 2018.
- Field J. Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. En: Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB. Universidad del Valle, CVC. Universidad Agrícola de Wageningen, 1987.
- Gropelli E., Giampaoli O. Biodigestores. Una propuesta sustentable. Primera Edición, Ediciones UNL, 2012, ISBN 9789876577946.
- Guevara Vera A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1996.
- Hilbert J.A. Manual para la producción de biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T. A - Castelar, 2011.
- INTA. Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar, ISBN 978-92-5-306794-7, FAO 2012.
- INTA. Guía para productores familiares porcinos, Grupo de abastecimiento Local, Chacra experimental Integrada Barrow, 2018.

- INTA EEA. Manfredi. Proyecto de generación de biogás y biofertilizante con residuos de mercado. 2014. Disponible en: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/Proyecto-Generacion-Biogas-Fertilizante-Con-Residuos-del-Mercado.pdf>. [Fecha de consulta: (20/05/2020)].
- Matiauda M., Deschutter E. Rendimiento de Biogas de biodigestor de establecimientoporcícola de Posadas, Redepositario Institucional Digital de laUniversidad Nacional de Misiones, PROFAE, 2018.
- Martin Herrero J. Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Redbiolac, Ecuador. ISBN 978-9942-36-276-6, 2019.
- Metcalf L., Eddy H. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Primera Edición, McGraw-Hill, 1977, ISBN 8433564161.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Inventario Nacional de Gases de efecto Invernadero, 2018.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Inventario Nacional de Gases de efecto Invernadero, 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Guía Teórico-Práctica Sobre el Biogas y los Biodigestores, Colección Documentos Técnicos N°12, Buenos Aires, ISBN 978-92-5-131559-0, FAO, 2019.
- Parra Huertas R. A. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Rev. P+L* [online]. 2015, vol.10, n.2 . Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso). ISSN 1909-0455. [fecha de consulta 20/05/2020].
- Pedraza G., Chará J. Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. CIPAV Cali, Colombia. 2002. Disponible en: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd14/1/Pedr141.htm> [Fecha de consulta: 20/05/2020].

- Salas H. Proyecto de producción de engorde a corral para ganado vacuno (Feedlot) y granja porcina. Estudio de impacto ambiental. Tucumán, Estudio Hugo Salas, 2009.
- Subsecretaría de Ganadería, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Anuario 2018 Porcinos.
- Varnero Moreno M.T. Manual del biogás, Ministerio de Energía, Gobierno Chile, 2011.