



El ambiente
es de todos

Minambiente

Guía de biogás

para el sector
porcícola
en Colombia



Asociación
porkcolombia
FONDO NACIONAL DE LA PORCICULTURA



Porkcolombia – Fondo Nacional de la Porcicultura
Programa de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social empresarial

VALIDACIÓN

Jeffrey Fajardo López
Presidente ejecutivo

Diana Corina Zambrano
Vicepresidente Ejecutiva

DIRECCIÓN Y REVISIÓN

Porkcolombia – Fondo Nacional de la Porcicultura.

Clara Marcela Rodríguez
Directora área técnica

María Oliva Rodríguez Galindo
Coordinadora de gestión ambiental

Angela Patricia Siabato Cetina
Profesional de apoyo a la gestión ambiental y R.S.E

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana
Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo

María Cecilia Concha Albán
Asesora

Carlos Mauricio Silva Fernández
Contratista

Michael Andrés Cortés Caro
Contratista

AUTORES

Zania Sidartha Roa
Profesional de sostenibilidad

Juan Carlos Mendoza Corba
Consultor

Silvia Susana González Muñoz
Consultor

Felipe Luis Kaiser Caldera
Consultor

Alejandro Gebauer
Consultor

COMUNICACIONES

Daniel Guillermo Bernal
Gerente de Comunicaciones
Porkcolombia - Fondo Nacional de la Porcicultura

REVISIÓN EDITORIAL

Iván Camilo Tuta
Asesor de Comunicaciones Integrales
Porkcolombia - Fondo Nacional de la Porcicultura

DISEÑO E ILUSTRACIÓN

Jaime Giraldo Londoño

ISBN

978-958-52236-2-2

2020

PRESENTACIÓN

La porcicultura puede agregar valor a la producción a través de la implementación de prácticas sostenibles, tal como es el uso de la porcinaza en procesos de generación de bioabono y biogás. El primero como fuente no convencional de energía renovable, y el segundo, como fertilizante orgánico para mejorar la productividad de los suelos y/o para ayudar a su recuperación cuando se encuentran degradados y poco fértiles.

Tanto el biogás como el biol, se obtienen por la transformación de la biomasa dentro de un sistema de digestión anaerobia llamado biodigestor. Producir energía a partir de porcinaza es deseable, no sólo porque genera una economía baja en carbono que aprovecha la biomasa, que, dispuesta de otro modo, genera efectos adversos al ambiente, sino porque disminuye la necesidad de explotación forestal y de consumo de combustibles fósiles. De esta manera, la granja encaja en un modelo de economía circular, que no sólo redundará en beneficios para el medio ambiente sino también para el porcicultor.

El uso de la porcinaza para la generación de energía y abono, además de las evidentes ventajas ambientales, tiene ventajas económicas y sociales como la reducción de costos energéticos derivados del uso de energía eléctrica y térmica, así como ahorros en la compra de fertilizantes e independencia y flexibilidad energética en zonas rurales alejadas.

Aparte de las ventajas mencionadas, percibidas directamente por los usuarios, a nivel país, el uso de la porcinaza facilita el cumplimiento de compromisos internacionales en materia de cambio climático, por la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y permite que zonas no interconectadas a la red eléctrica y marginadas de los beneficios que esta genera, puedan tener acceso al aprovechamiento térmico (y en algunos casos a la electricidad) y a un mejor desarrollo rural. Lo anterior es especialmente importante para comunidades que se encuentran aisladas y en condiciones de vulnerabilidad.

La presente guía se desarrolló con el objetivo de impulsar una porcicultura sostenible y más amigable con el ambiente, a través del aprovechamiento de la porcinaza, lo cual se constituye como uno de los pilares del programa de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social empresarial de Porkcolombia – Fondo Nacional de la Porcicultura y con seguridad será de gran utilidad para los porcicultores de Colombia.

Jeffrey Fajardo López

Presidente Ejecutivo

Porkcolombia-FNP

PRÓLOGO

El compromiso del Gobierno Nacional con la sostenibilidad de los sectores productivos reflejado en el Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022 es innegable. El emprendimiento y la innovación de las actividades productivas, tradicionalmente enmarcadas en una economía lineal de “hacer, usar y desechar” por una economía circular que utilice menos recursos en el mayor tiempo posible es fundamental.

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), la primera de Latino América, desarrollada por este gobierno, introduce nuevos elementos para fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país, a partir de la lógica de “producir conservando y conservar produciendo”.

La estrategia promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales.

El principal aporte diferenciador del modelo de Economía Circular en Colombia es su carácter sistémico y holístico para impulsar la transformación de los sistemas productivos, de esquemas lineales hacia modelos circulares. Esta transformación implica un proceso de cambio técnico y cultural a través de diversas tipologías de innovaciones, a diferentes niveles de los sistemas productivos, aunado a una transformación cultural y a un cambio de paradigma en la producción.

El biogás, una fuente no convencional de energía que se produce por fermentación de residuos orgánicos mediante un proceso de digestión anaeróbica, no es la excepción.

Es muy importante recordar que la conversión de la biomasa residual porcícola en biogás capturado, contribuye a disminuir las emisiones de gases efecto invernadero GEI, que en exceso aceleran el calentamiento global, y así mismo, genera nuevos beneficios al productor como ahorros en la tarifa de electricidad y en la disponibilidad de energía térmica para sus procesos. Y es precisamente donde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible promueve la utilización de fuentes alternativas de generación de energía en las actividades productivas, acompañando iniciativas orientadas a cambiar el modelo lineal por uno circular.

Con la disponibilidad de la porcínaza y demás residuos resultantes de la actividad porcícola en muchas regiones de Colombia y su poder calorífico (de acuerdo a Upme, 2017 se estima una producción anual de 2.747.400 Toneladas de biomasa residual porcícola, con un potencial técnico factible de 2.120 Terajoules por año) el país tiene una gran oportunidad de aprovechar y generar biogás a pequeña y mediana escala para el beneficio de muchos.

Por lo anterior, acompañamos la iniciativa de Porkolombia- Fondo Nacional de la porcicultura, de educar y orientar a los granjeros en el manejo y aprovechamiento sostenible de biodigestores para la producción de biogás, el cumplimiento de compromisos del Acuerdo de París y la eficiencia energética del país.

Esta iniciativa facilitará e incentivará, en todas las escalas de producción porcícola, el aprovechamiento de sus residuos y subproductos, minimizando los impactos ambientales y maximizando los márgenes de rentabilidad de la producción.

El biogás para la generación de energía es una de las soluciones más interesantes y modernas para el manejo y gestión integral de residuos, ya que como resultado del proceso de digestión anaerobia de la porcínaza se produce energía que puede ser usada para autoconsumo y para el proceso productivo, y un digestato que bajo ciertas condiciones controladas y cumpliendo la normatividad ambiental colombiana puede ser utilizado como enmienda orgánica de suelos.

Por lo anterior, la presente guía se constituye en el punto de partida para promover emprendimientos a pequeña y mediana escala de biogás en el sector porcícola, la cual contiene componentes y particularidades del biogás, así como detalles de la instalación y la técnica de digestión anaeróbica,

Dicho documento adicionalmente muestra algunas tecnologías de biodigestores, técnicas de purificación y acondicionamiento del biogás, así como consideraciones para la producción de digestato, estimativos de costos y los incentivos financieros y tributarios a los que se puede acceder para este tipo de proyectos.

La guía está escrita en un lenguaje sencillo y práctico, con orientación técnica y buenas prácticas para emprender un desarrollo de biogás en el país. Además, es de fácil comprensión para pequeños y medianos poricultores, autoridades ambientales, sanitarias y todos los actores interesados en desarrollar y aprovechar el potencial energético de los residuos generados, contribuyendo a los objetivos de desarrollo sostenible.

Para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es grato acompañar al sector porcícola en la búsqueda de alternativas sostenibles en sus operaciones, y estamos seguros que esta guía es una oportunidad para sensibilizar a muchos productores a avanzar en la transformación hacia la economía circular.

Finalmente resaltamos el compromiso del sector agropecuario con alcanzar altos estándares de sostenibilidad y ser referente de la economía circular en Colombia.

RICARDO LOZANO PICÓN

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Tabla de contenido

Índice de tablas	7
Índice de ilustraciones	9
Índice de anexos	10
Glosario	11
Introducción	15
Contexto internacional en producción y aprovechamiento de biogás	16
Contexto nacional en producción y aprovechamiento de biogás	17
Barreras para la implementación de sistemas de digestión anaerobia a partir de porcinoza	19
Perspectivas a futuro de los sistemas de digestión anaerobia, en un contexto nacional que promueve la economía circular y que fomenta las fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER)	20
La razón de ser de esta guía y qué puede encontrar en ella	21
1. El biogás y sus usos	23
2. El proceso de producción de biogás	27
2.1 Composición química de la materia orgánica	27
2.2 Contenido de agua, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)	31
2.3 pH	34
2.4 Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis	36
2.5 Temperatura	37
2.6 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y Velocidad de Carga (VCO)	39
3. Potencial de generación de biogás en la porcicultura	42
3.1 Estimación del potencial de producción de biogás a partir del contenido de sólidos volátiles	43
3.2 Estimación del potencial de producción de biogás a partir de la remoción de DQO (Demanda Química de Oxígeno).	45

4. Tipos de biodigestores	48
4.1 Reactores anaerobios de funcionamiento semi-continuo y de bajo costo	48
4.1.1 Biodigestor tipo chino o de cúpula fija	49
4.1.2 Biodigestor tipo hindú o de campana flotante	50
4.1.3 Biodigestor tipo Taiwan o de flujo continuo	50
4.2 Sistemas de lagunas cubiertas	62
5. Acondicionamiento del biogás	64
5.1 Secado del biogás: Procesos de remoción del vapor de agua	64
5.2 Proceso de limpieza del biogás: La remoción del sulfuro de hidrógeno H ₂ S	65
5.3 Proceso de purificación del biogás: La remoción del CO ₂	68
6. Seguridad en la producción de biogás	70
7. Beneficios y ventajas de la producción de biogás	78
8. Evaluación económica de un sistema de digestión anaerobia	82
9. Incentivos para la implementación de fuentes no convencionales de energías renovables en Colombia	85
Bibliografía	93

Índice de tablas

TABLA 1. Composición promedio del biogás.....	23
TABLA 2. Equivalencia de biogás con otras fuentes de energía	24
TABLA 3. Consumos de biogás promedio para diferentes usos y artefactos	24
TABLA 4. Residuos orgánicos para la producción de biogás.....	26
TABLA 5. Composición química de diversos residuos de origen animal (valores promedios, base seca)	29
TABLA 6. Niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal	30
TABLA 7. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos animales	30
TABLA 8. Contenido de sólidos totales (ST) promedio de diversos animales	31
TABLA 9. Mezcla estiércol – agua (de referencia) para cargar el biodigestor	33
TABLA 10. Ejemplo para el registro del medidor de caudal	33
TABLA 11. Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y concentraciones perjudiciales	36
TABLA 12. Rangos de temperatura de los diferentes grupos de bacterias.....	38
TABLA 13. Relaciones de referencia entre temperaturas y tiempos de retención	39
TABLA 14. Características generales de los sustratos comunes más utilizados en proyectos de biogás	41
TABLA 15. Ejemplo sobre inventario de granja porcícola	43
TABLA 16. Característica de los plásticos más utilizados para el montaje de biodigestores tubulares.....	55
TABLA 17. Fallas en materiales de construcción y sus causas	58
TABLA 18. Fallas en el proceso de instalación y sus causas	58
TABLA 19. Fallas en el funcionamiento y sus causas.....	59
TABLA 20. Actividades para el correcto funcionamiento del biodigestor	60
TABLA 21. Tratamiento según el uso final del biogás.....	64
TABLA 22. Tecnologías para el secado del biogás.....	65

TABLA 23. Requerimiento de pureza para usos de biogás	66
TABLA 24. Métodos de remoción del sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) (desulfuración).....	67
TABLA 25. Tecnologías para la remoción de dióxido de carbono (CO ₂).....	69
TABLA 26. Peligros y riesgos potenciales durante la operación de un biodigestor.....	72
TABLA 27. Propiedades de los gases	73
TABLA 28. Efecto tóxico del sulfuro de hidrógeno - H ₂ S.....	73
TABLA 29. Medidas de prevención.....	75
TABLA 30. Costos de implementación de biodigestores plásticos de 3 tamaños por modelo de construcción artesanal.....	83
TABLA 31. Beneficios de la implementación de biodigestores plásticos de 3 tamaños por modelo de construcción artesanal.....	83
TABLA 32. Costos de implementación de biodigestores plásticos comerciales de 3 tamaños por compra del biodigestor con casas comerciales.....	84

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. Número de biodigestores domésticos y la inversión gubernamental anual de China en biogás (1974-2011).....	16
ILUSTRACIÓN 2. Motor generador a biogás	25
ILUSTRACIÓN 3. Esquema básico del proceso de digestión anaerobia.....	26
ILUSTRACIÓN 4. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos orgánicos.....	28
ILUSTRACIÓN 5. Medidor de caudal.....	33
ILUSTRACIÓN 6. Escala de pH.....	34
ILUSTRACIÓN 7. Variación en la composición del biogás en función del pH.....	35
ILUSTRACIÓN 8. Temperaturas del proceso de digestión anaeróbica.....	38
ILUSTRACIÓN 9. Correlación entre la tasa de carga orgánica y el tiempo de retención para la porcinoza	40
ILUSTRACIÓN 10. Rendimiento medio en biogás de diferentes materias primas.....	42
ILUSTRACIÓN 11. Potencial factible de generación de biogás a partir de porcinoza	46
ILUSTRACIÓN 12. Biomosas residuales priorizadas para generación de biogás	47
ILUSTRACIÓN 13. Biodigestor tipo chino	49
ILUSTRACIÓN 14. Biodigestor tipo hindú.....	49
ILUSTRACIÓN 15. Biodigestores tipo Taiwán	49
ILUSTRACIÓN 16. Biodigestor tipo chino	50
ILUSTRACIÓN 17. Biodigestor tipo hindú	51
ILUSTRACIÓN 18. Biodigestor tipo Taiwán.....	51
ILUSTRACIÓN 19. Esquematización de la metodología para el dimensionamiento de un biodigestor de flujo continuo	54
ILUSTRACIÓN 20. Instalación de salida del biogás y válvula de seguridad.....	57
ILUSTRACIÓN 21. Válvula de seguridad	57
ILUSTRACIÓN 22. Esquema de sistema de lagunas cubiertas.....	62

ILUSTRACIÓN 23. Diagrama de espina de pescado de las causas de accidentes en plantas de biogás.....	71
ILUSTRACIÓN 24. Esquema general de un sistema de digestión anaerobia.....	76
ILUSTRACIÓN 25. Simbología para identificar los equipos permitidos para el trabajo en una atmósfera explosiva	76
ILUSTRACIÓN 26. Quemador	77
ILUSTRACIÓN 27. Cerca perimetral.....	77

Índice de anexos

ANEXO 1. Potencial energético de la porcinoza en Colombia.....	88
ANEXO 2. Lista de bienes y servicios excluidos del IVA y exentos de gravamen arancelario para proyectos y sistemas para uso energético en biomasa.....	89

A

Abono: fertilizante que al ser agregado a la tierra la hace más rica en nutrientes y más productiva.

Acetogénesis: proceso microbiológico en el cual ocurre la degradación de ácidos grasos volátiles a acetato e hidrógeno.

Acidogénesis: proceso microbiológico en el cual aminoácidos y azúcares simples son degradados a ácidos grasos volátiles, principalmente acetato.

Afluente: agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

Atmósfera explosiva: mezcla con aire, en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, tras una ignición, la combustión se propaga a la mezcla no quemada.

B

Biodigestor: contenedor en el que se produce la degradación anaeróbica de la materia orgánica, conocido también como digestor, reactor o fermentador.

Biofertilizante: abono de origen orgánico (sólido o líquido), que aporta al suelo elementos minerales en formas disponibles para las plantas.

Biogás: gas que se ha producido por la descomposición biológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Biol: efluente del proceso de digestión anaerobia que se lleva a cabo dentro de un biodigestor. Se usa como un potente abono orgánico.

Biomasa: amplia gama de materiales orgánicos producidos a partir de plantas y animales.

Bosta: Excremento de ganado vacuno o caballar

Codigestión: variante tecnológica de la digestión anaerobia que se basa en la incorporación de más de un sustrato para producir biogás.

C

Cogeneración: generación de energía eléctrica y térmica a partir del mismo combustible.

Consorcio bacteriano: asociación natural de poblaciones de bacterias de diferentes especies, que trabaja de manera conjunta en un sistema complejo, y donde la actividad de unas beneficia a las demás.

D **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

Digestato: residuo líquido o sólido estabilizado que se obtiene de un digestor anaerobio tras la obtención de biogás (sinónimo: bio)

Dióxido de carbono (CO₂): Es el gas que se produce de forma natural y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta el equilibrio de radiación del planeta. Es el gas de referencia frente al que se miden otros GEI, y por lo tanto tiene un potencial de calentamiento global de 1.

Dioxido de carbono equivalente (CO₂e): es la unidad de medición que compara el potencial de calentamiento global de cada uno de los GEI con respecto al dióxido de carbono.

E **Eficiencia Energética:** es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles.

Efluente: cualquier residuo líquido o subproducto que entra en el ambiente desde algún punto de origen.

Estiércol: excremento de cualquier animal.

Exoenzima: enzimas extracelulares que son excretadas a través de la pared celular al medio ambiente, para catalizar reacciones de degradación de macromoléculas.

Emisión de GEI: es la liberación de la masa de un GEI.

F **Fertilizante:** sustancia que contiene nutrientes en formas asimilables por las plantas, y que estimula el crecimiento vegetal.

Fuentes convencionales de energía: son aquellos recursos de energía que son utilizados de forma intensiva y ampliamente comercializados en el país.

Fuentes No Convencionales de Energía: son aquellos recursos de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCE la energía nuclear o atómica y las FNCER.

Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER): son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera

marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.

G **Gases de efecto invernadero (GEI):** son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y reemiten radiación infrarroja, de acuerdo con lo definido por la CMNUCC.

Guano: materia formada por la acumulación de excrementos de las aves.

H **Heces:** materia orgánica que se elimina por el ano después del proceso de digestión de los alimentos

M **Metano:** es un gas incoloro, inflamable, no tóxico, cuya fórmula química es CH₄. Este gas se produce de forma natural por la descomposición de la materia orgánica actuando como un gas de efecto invernadero.

El metano es además uno de los principales componentes del gas natural. Se extrae fundamentalmente de yacimientos y se utiliza como combustible y con fines industriales.

Metanogénesis: proceso microbiológico en la cual el acetato e hidrógeno son convertidos a metano y dióxido de carbono.

P **Porcinaza:** es un subproducto de la actividad porcícola que resulta de la mezcla de las heces y orina de los animales, con descamaciones, pelo, comida no digerida y agua.

Purín: mezcla de excreta animal con orina y agua de lavado en una producción pecuaria (bovino o porcino).

R **Reducción de Emisiones de GEI:** es la disminución calculada de emisiones de GEI entre un escenario de línea base o nivel de referencia y de las emisiones netas calculadas en el ámbito de la implementación de la iniciativa de mitigación de GEI.

Recuperador de suelos: Es un producto que mejora y/o recupera la estructura y calidad de la tierra que ha sido afectada por fenómenos de diferente naturaleza. Los recuperadores de suelo no son fertilizantes como tal porque no contienen tantos nutrientes.

Riesgo: probabilidad de ocurrencia de un suceso que pueda causar un daño, y también, el grado de severidad del mismo.

S

Seguridad: condición en que se mitiga el riesgo de sufrir o causar un daño a las personas o a las cosas.

Sólido volátil: la porción de la materia orgánica que puede eliminarse o volatilizarse cuando se quema en un horno mufla a una temperatura de 550 °C.

T

Tiempo de retención: cantidad de tiempo promedio que los sustratos permanecen en el reactor o biodigestor, cuando se tienen procesos de flujo continuo.

Velocidad de carga: cantidad de materia orgánica que se alimenta al biodigestor o reactor, por unidad de tiempo (día) y por unidad de volumen del biodigestor o reactor (m³)

Introducción

La bioenergía es un tipo de energía renovable, que se genera partir de la transformación química de una amplia gama de materias primas de origen biológico, y que puede utilizarse para generar calor, electricidad o como biocombustible, desempeñando un papel importante en muchos escenarios bajos en carbono, dado que se produce y se usa de manera sostenible, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, y trayendo consigo otros beneficios ambientales, sociales y económicos. La generación y uso de energía renovable ha ido creciendo de manera significativa en los últimos años, y según el reporte global de la red mundial de políticas en energía renovable REN21, a 2018 las energías renovables llegaron a suministrar más del 26% de la electricidad global, un 10% de la energía utilizada para calor/ frío, y un poco más del 3% de la energía para el transporte (REN21, 2019).

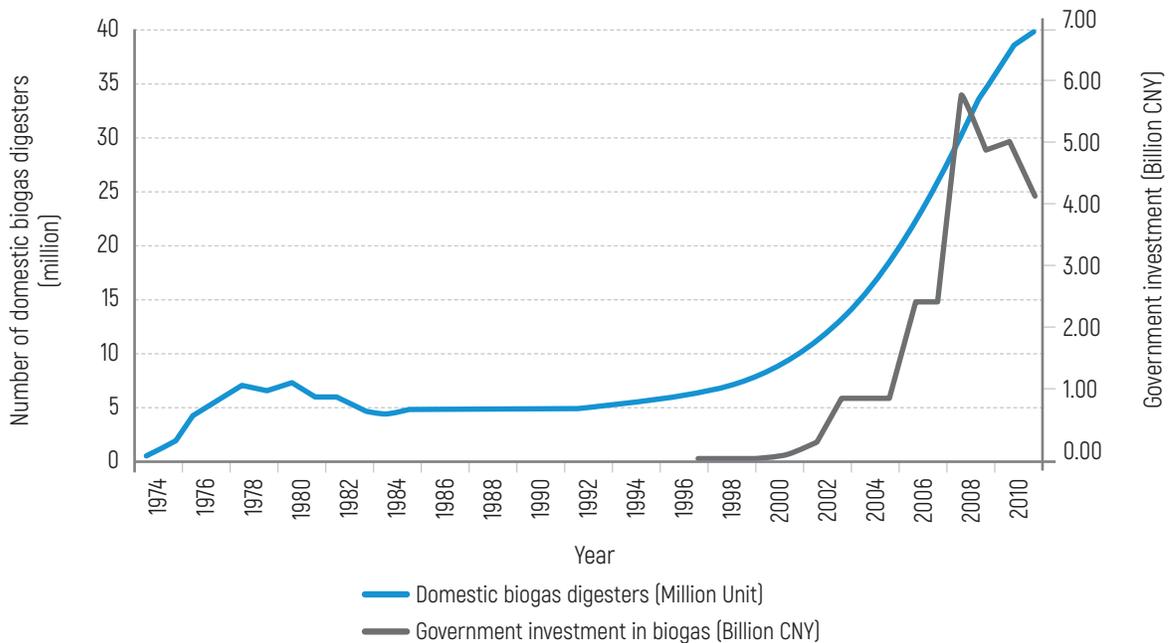
En el sector porcícola, la porcínaza representa una gran oportunidad para la generación de energía renovable, pues es una biomasa disponible en grandes cantidades, y que puede transformarse en biogás para su aprovechamiento, y para la satisfacción de muchas de las necesidades de las granjas (como la calefacción de lechones, la cocción de alimentos, la generación de agua caliente, o incluso, para la generación de energía eléctrica como tal). La digestión anaerobia de la porcínaza, además de gas, genera un bio-abono, también conocido como digestato o biol, que puede usarse como fertilizante en diferentes tipos de pastos y cultivos, o como adecuador de suelos para mejorar terrenos muy degradados o poco fértiles, este aprovechamiento se puede realizar teniendo en cuenta la normatividad vigente y su uso potencial dependerá de sus características, así como las condiciones del suelo donde se pretenda aplicar. El uso de la porcínaza para la generación de biogás y biol, ayuda a cerrar el ciclo de materiales en el sector porcícola, y se convierte en un ejemplo de economía circular que genera valor agregado al tiempo que reduce los residuos e impactos.

La presente guía, busca familiarizar al porcicultor con el proceso de digestión anaerobia, y con las variables que debe tener en cuenta a la hora de implementar un sistema de biodigestión. También entrega al porcicultor información útil sobre la tecnología disponible, para que así el productor pueda tener conocimiento suficiente para desarrollar su propio proyecto de biogás, de acuerdo con su potencial, su presupuesto y sus necesidades.

Contexto internacional en producción y aprovechamiento de biogás

Durante la década de los setentas, el gobierno chino instaló más de siete millones de digestores en hogares campesinos, para satisfacer las necesidades energéticas de su población. Para 2007, la mayoría de los casi 27 millones de plantas de biogás que se habían instalado en el mundo, se encontraban en ese país, y en 2010, con la construcción de 5 millones de nuevas unidades, se calcula que China llegó a un total de 40 millones de biodigestores instalados (Ilustración 1) (Acosta. P & Pasqualino, 2014; International Institute for Environment and Development, 2013).

Ilustración 1. Número de biodigestores domésticos y la inversión gubernamental anual de China en biogás (1974-2011)



Fuente: (International Institute for Environment and Development, 2013)

Dentro del mismo continente asiático, el gobierno de la India en 2007 financió la construcción de casi cuatro millones de biorreactores domésticos, aunque, pese a los esfuerzos, para 2011 sólo se reportaron 4,4 millones de unidades en operación. En África, se desarrollaron, y aun se desarrollan varios programas para difundir esta tecnología. Se estima que se han construido cerca de 70.000 unidades de biodigestión (Acosta. P & Pasqualino, 2014). Gracias a la tecnología de la digestión anaerobia, miles de familias en las áreas rurales de estos dos continentes ahora tienen acceso a estufas domesticas alimentadas con biogás, lo que ha ayudado a disminuir las problemáticas asociadas a la mala disposición de excretas, los altos niveles de contaminación atmosférica, y las enfermedades respiratorias causadas por uso de combustibles como la madera, el estiércol, los residuos agrícolas y el carbón (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018).

En el continente europeo entre 2009 y 2015, el número de plantas de biogás prácticamente se triplicó, pasando de 6.000 a 17.000 unidades, y elevando la producción de biogás al 9% anual. Alemania, el país europeo con mayor número de plantas de biogás, espera alimentar con seis mil millones de metros cúbicos de biometano la red de gas natural para 2020, lo que equivale a cerca del 7% de su consumo total, y para 2030, la meta es inyectar diez mil millones de metros cúbicos al mismo sistema, mejorando los niveles de autonomía energética de esta nación. Actualmente en Europa la producción de electricidad a partir de biogás es de 3.032 Teravatio-hora (TWh), lo que equivale al 1,9% del total de energía eléctrica generada. Alemania, Italia y el Reino Unido, son los países europeos con mayor número de plantas de generación eléctrica a partir de biogás (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018).

En el escenario latinoamericano, y con cerca de 25 plantas de biogás conectadas a la red eléctrica, Brasil es el país que más ha avanzado en la producción de biogás. La mayoría de las plantas brasileras se encuentran ubicadas en propiedades agrícolas y en rellenos sanitarios. Los usos más frecuentes del biogás son, la generación de electricidad y calor, y de manera menos frecuente su uso como combustible para vehículos (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018). El atraso latinoamericano en el desarrollo de la tecnología de digestión anaerobia tiene que ver principalmente con barreras como: la alta disponibilidad de madera como combustible en las zonas rurales, la necesidad de mejoras técnicas, la falta de aceptación social y los altos costos de inversión para su implementación (Garfí, Martí-Herrero, Garwood, & Ferrer, 2016). Pese a la falta de incentivos y al uso de fuentes alternativas de combustión, algunos pequeños grupos y sectores de productores y campesinos, en la mayoría de los casos con el apoyo de agencias de cooperación y grupos organizados con participación de diferentes sectores, han llegado a implementar pequeños prototipos en zonas rurales de varios países. Los resultados aún no han logrado impactar al nivel que se quisiera, lo que no ha permitido que se incremente la difusión y utilización de los sistemas de biodigestión (Acosta. P & Pasqualino, 2014).

Pese a las dificultades mencionadas, desde 2009, con la creación de la Red para Biodigestores en América Latina y el Caribe (RedBioLAC), se han logrado algunos avances importantes entre los que se incluyen: el desarrollo de varias conferencias en diferentes países de América Latina sobre sistemas de digestión anaerobia, la integración de 18 países en la RedBioLAC (2014), un mayor flujo y difusión de la información sobre innovaciones en el campo; mayor diálogo sobre la gestión de proyectos de biogás; y más investigación en materia de barreras técnicas, ambientales, sociales y económicas para la difusión de los biodigestores, entre otros avances (Garfí, Martí-Herrero, Garwood, & Ferrer, 2016).

Contexto nacional en producción y aprovechamiento de biogás

En Colombia, la implementación y el uso de biodigestores no surgió como respuesta a las necesidades energéticas, como sí ocurrió en el continente asiático, sino para resolver problemas relacionados con el manejo de aguas residuales, estiércol y malos olores. De

hecho, al principio un gran número de biodigestores fueron construidos, más porque se requería de la implementación de sistemas de producción más limpia, que a su vez dieran cumplimiento a leyes y compromisos nacionales e internacionales adquiridos con la firma de diferentes tratados y acuerdos, que por el interés en desarrollar sistemas de producción de energía y biogás (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018).

En el sector porcícola puntualmente, la contaminación de fuentes de agua por vertimientos orgánicos, ha causado que las autoridades ambientales establezcan el pago de tasas retributivas, cada vez más costosas, para aquellas granjas que generan vertimientos de aguas residuales, de manera que exista una presión sobre el porcicultor para que establezca un sistema de tratamiento que reduzca la contaminación. Dentro del mismo esquema, las autoridades ambientales también exigen dar manejo a otros aspectos relacionados como:

- Control de moscas y roedores
- Control de olores
- Ahorro y uso eficiente del agua
- Tratamiento de las aguas residuales
- Manejo de mortalidad, placentas y amputaciones
- Gestión integral de residuos peligrosos

La descontaminación de aguas residuales es uno de los puntos más complicados y más costosos de tratar en las granjas porcícolas. El biodigestor, ha probado ser una manera sencilla, eficiente y de bajo costo, para solucionar el manejo de las mismas, dando valor agregado con la generación del biol y el biogás (Chará Orozco, 2002).

Hoy en día, diferentes organizaciones y universidades dentro y fuera del territorio nacional, han desarrollado, y aún están desarrollando proyectos e investigaciones que buscan dar solución a los problemas puntuales de cada sector, utilizando el contenido energético de la biomasa que se genera como subproducto de su actividad. Algunos proyectos, han llegado incluso a la construcción de prototipos de biodigestión. El resultado de todos estos esfuerzos, y del trabajo conjunto entre la academia y el sector privado, ha hecho que en Colombia hoy existan plantas de digestión anaerobia con producción de biogás, que son alimentadas con subproductos de sectores como el palmicultor, el avícola, el porcícola, el cervecero, el lechero, e incluso con subproductos o efluentes de plantas de beneficio animal y rellenos sanitarios. Uno de los más reconocidos casos de éxito en la implementación de biodigestores, es el reportado por el sector porcícola, con Aliar - La Fazenda en Puerto Gaitán (Meta), donde con la instalación de 4 biodigestores de flujo continuo, alimentados con los residuos de cerca de 72.800 cerdos de ceba, se generan 136.528 metros cúbicos de biogás al día, que pueden ser utilizados para la generación eléctrica (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018).

En Colombia no existe un dato exacto de cuantos biodigestores hay, sin embargo, para el año 2007 se llegó a tener un estimado no oficial de 5500 a 5700 unidades de biodigestión (TvAgro, 2015). Actualmente, la Red Colombiana de la Energía de la Biomasa - RedBioCol, ha puesto en marcha la iniciativa “Censo de Biodigestores” para conocer cuántos biodigestores hay instalados en el país.

El éxito alcanzado por algunos sectores, como los arriba mencionados, contrasta bruscamente con los problemas y dificultades que los pequeños productores y campesinos colombianos han tenido en la implementación de plantas de biodigestión. La falta de información y conocimiento para un adecuado dimensionamiento, montaje, mantenimiento y operación, ha sido hasta ahora las razones por las cuales la mayoría de los biodigestores instalados no funcionan y/o presentan múltiples fallas durante su operación. Esta situación, sumada a los altos costos iniciales para la construcción, termina desmotivando e inviabilizando el uso de esta tecnología para el pequeño productor, aun cuando lo cierto es, que esta tecnología tiene mucho que ofrecer a los pequeños productores y campesinos, no sólo desde la perspectiva ambiental, sino desde lo energético, lo económico, en materia de cumplimiento de la normatividad, y en general, porque aporta a la sostenibilidad de largo plazo del proyecto productivo.

Barreras para la implementación de sistemas de digestión anaerobia a partir de porcínaza

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con base en reuniones sostenidas con profesionales del sector porcícola, la academia, asociaciones y gremios del sector agropecuario, así como con operarios y trabajadores de algunas granjas visitadas, ha identificado como principales barreras para la tecnificación de las granjas hacia la producción de biogás, las siguientes:

1. Desconocimiento de los beneficios y oportunidades derivados del aprovechamiento energético de la porcínaza y los residuos orgánicos que se generan en la producción porcícola.
2. Desconfianza al momento de incorporar la tecnología de digestión anaerobia por malas experiencias de terceros.
3. Malas experiencias propias en la implementación de sistemas de biodigestión.
4. Falta de conocimiento para el diseño, montaje, operación y mantenimiento de estos sistemas.
5. Dificultad para conseguir materiales y repuestos, para ubicar proveedores de los materiales y personal calificado para su instalación.
6. Temor con respecto al uso y almacenamiento del biogás que se genera.
7. Mitos sobre incrementó de los olores ofensivos alrededor de la granja, y que se fundamentan, ya sea en una mala implementación y mantenimiento del sistema, o en daños y fugas del material que se carga¹.

¹ Cuando alguno de los materiales utilizados presenta algún orificio, o hay una sobre carga orgánica del biodigestor por una mala operación, el sistema deja de funcionar correctamente, y se convierte en un foco de contaminación que puede atraer problemas de vectores y malos olores.

8. Dificultades para la financiación de proyectos de manera privada, o incluso a nivel comunitario.
9. Desconocimiento de incentivos y de programas de apoyo por parte del Gobierno para la implementación de este tipo de sistemas.
10. La no incorporación de los beneficios económicos de los biodigestores dentro de las cuentas del negocio (por aprovechamiento de biogás y bio-abono).

Perspectivas a futuro de los sistemas de digestión anaerobia, en un contexto nacional que promueve la economía circular y que fomenta las fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER)

Con la Estrategia Nacional de Economía Circular, el Gobierno busca incentivar a productores, proveedores y consumidores, para que desarrollen e implementen nuevos modelos de negocio, que incorporen la gestión de los residuos y el manejo eficiente de los materiales, el agua y la energía, de manera que se respete la capacidad de recuperación de los ecosistemas, y la circularidad de los flujos de materiales, en pro de generar un desarrollo con enfoque de sostenibilidad. El uso de la innovación tecnológica, las alianzas y la colaboración entre actores es fundamental para el logro de dicho objetivo, y para una transformación de la economía lineal en economía circular.

El proceso de transición, de la economía lineal a la economía circular, implica un proceso de cambio y ajuste del paradigma productivo por parte del porcicultor. Los cambios requeridos en dicha transición pueden involucrar desde asuntos como la valoración de los residuos, el cierre de ciclo de materiales, y la extensión de la vida útil de productos y partes, hasta temas como el cambio de productos por servicios, la innovación en la gestión de datos a través de herramientas digitales, la innovación tecnológica, y el cambio mismo en los modelos de negocio de la granja tradicional.

Esta guía está enfocada específicamente en la valorización de los residuos y el cierre de ciclos, y puntualmente busca el aprovechamiento de la porcinaza, para la producción simultánea de bio-abono y biogás. Los sistemas de biodigestión facilitan esta transformación y transición productiva logrando mejorar considerablemente la circularidad de las granjas porcícolas, y los beneficios ambientales y económicos recibidos por los porcicultores, su entorno y la sociedad.

De hecho, durante los últimos años, el enfoque de economía circular ha contribuido a incrementar el interés en el aprovechamiento de residuos en los procesos de generación energética, y ha dado paso al desarrollo de nueva legislación, que apunta a promover el aprovechamiento del contenido energético de los residuos, evitando que estos se pierdan a través de malas prácticas de disposición que sólo generan contaminación. Puntualmente, dentro de La Estrategia Nacional de Economía Circular, una de las líneas se enfoca

específicamente en la generación de energía a partir de biomasa, y en el aprovechamiento del digestato como abono o enmienda orgánica.

Si de manera simultánea, combinamos los intereses de La Estrategia Nacional de Economía Circular, con el interés del Gobierno Nacional por fomentar las Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER); a través del aprovechamiento del contenido energético de la biomasa que se genera como subproducto y/o residuo de diferentes procesos agropecuarios e industriales. Es posible ver cómo los biodigestores pueden aportar, no sólo a la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, sino a impulsar el potencial de generación energética de la biomasa no utilizada para lograr soluciones energéticas para zonas rurales vulnerables y actualmente aisladas del sistema interconectado nacional (Acosta. P & Pasqualino, 2014).

La razón de ser de esta guía y qué puede encontrar en ella

Como se mencionó en los apartados anteriores, los sistemas de digestión anaerobia (biodigestores) pueden aportar a la sostenibilidad de largo plazo de los proyectos productivos, aunque su apropiación y uso se ha limitado por la falta de adecuados procesos de acompañamiento y capacitación, puntualmente en temas como: dimensionamiento, montaje, mantenimiento, escalamiento y operación.

Esta guía se elaboró con el objetivo de brindar al poricultor la información necesaria, para entender de qué se trata esta tecnología, su potencial y alcances, y ser una herramienta que le permita estimar cuando se hace un buen dimensionamiento, implementación y operación de un biodigestor; independientemente de que el productor (o usuario de la tecnología) lo construya por sí mismo, o decida contratar su construcción con alguna casa comercial.

En el **capítulo uno** de esta guía, podrá encontrar generalidades sobre qué es el biogás, cuál es su composición, cuáles son sus usos, su utilidad potencial y su equivalencia energética. En el **capítulo dos**, se describen tanto las condiciones para su producción, como los procesos y productos que se dan al interior del biodigestor. En este apartado, se habla en detalle sobre la incidencia de la composición de la materia orgánica, el pH, la humedad, la temperatura y el tiempo de retención, entre otros factores, sobre los procesos de digestión.

El **tercer capítulo** se centra puntualmente en el potencial de generación de biogás en la porcicultura, y describe dos procedimientos sencillos y rápidos para estimar el potencial de producción de biogás a partir de la porcinoza. En el **cuarto capítulo** de la guía expone algunas de las tecnologías disponibles que podrían ser implementadas, entre ellas el biodigestor tipo salchicha o Taiwán, y en el sistema de laguna cubierta. También se proporcionan herramientas al productor para que pueda estimar cuando se hace un buen dimensionamiento del biodigestor, y se abordan los factores que se deben tener en cuenta en la etapa de diseño e implementación, independientemente de que lo construya por sí mismo

o de que contrate la construcción del sistema con alguna casa comercial. El **quinto capítulo** de la guía se enfoca en el acondicionamiento del biogás, y en los procesos de limpieza y remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S), del vapor de agua, y del dióxido de carbono (CO_2), llevando el contenido de metano a un porcentaje equivalente al gas natural.

En el **capítulo seis** de la guía se abordan los temas de seguridad en la producción del biogás, y se dan recomendaciones generales para evitar incendios, o envenenamiento y asfixia por inhalación; específicamente en los casos en los que el biogás no ha sido limpiado y desulfurado adecuadamente. El **capítulo siete** del documento, profundiza en los beneficios de la digestión anaerobia, tales como la producción de biogás y las oportunidades que puede representar el bio-abono con base en la normativa ambiental y sanitaria, el manejo adecuado de la porcinaza (y por tanto la eliminación de olores ofensivos), la reducción en la emisión de Gases de Efecto invernadero (GEI), y la posible generación de una fuente alternativa de ingresos por venta de gas y abono.

El **octavo capítulo** de la guía, permite al productor tener un estimado aproximado de costos de implementación. Finalmente, El **capítulo nueve** habla sobre los incentivos que existen en el país para la implementación de energías renovables, entre los que se pueden mencionar: la reducción en el impuesto de Renta, la exclusión del IVA y la exención de gravámenes arancelarios entre otros.

Esperamos que esta guía sea de utilidad para los usuarios e interesados en la implementación de sistemas de digestión anaerobia, y que se constituya como una herramienta de consulta, evaluación y mejoramiento de dichos sistemas, de manera que el uso de esta tecnología, no solo sea privilegio de algunos sino oportunidad para todos.

1 El biogás y sus usos

Biogás es el nombre que recibe la mezcla de gases que se genera durante el proceso de digestión anaerobia, o en un lenguaje más sencillo, es una mezcla de gases que se genera por la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno. La digestión anaerobia, es un proceso realizado por consorcios bacterianos compuestos por un gran número de bacterias metanógenas, es decir, bacterias que producen metano. Los gases que generalmente encontramos en el biogás son: el metano (CH_4) en porcentajes que van del 50% al 70%, el dióxido de carbono (CO_2) en porcentajes del 40% al 20%, y otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el nitrógeno (N_2) y el vapor de agua (H_2O), en concentraciones mucho más pequeñas (Tabla 1). Con excepción del metano (CH_4), los demás gases que encontramos en el biogás son considerados impurezas, por tanto, es necesaria la remoción de los mismos, a fin de obtener un biogás de buena calidad. (Martí Herrero, J, 2019; GIZ, MINENERGÍA, 2012)

Tabla 1. Composición promedio del biogás

Constituyente	Concentración
Metano (CH_4)	50-75 vol. %
Dióxido de carbono (CO_2)	25-45 vol. %
Agua (H_2O)	2-7 vol. % (20-40 °C)
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	20-20.000 ppm
Nitrógeno (N_2)	< 2 vol. %
Oxígeno (O_2)	< 2 vol. %
Hidrógeno (H_2)	< 1 vol. %

Fuente: ((FNR), 2010)



¿En qué se puede usar el biogás? El biogás es un biocombustible que puede ser equiparable a otras fuentes de energía como se puede ver en la Tabla 2. El biogás puede ser usado en el desarrollo de diferentes actividades como la cocción de alimentos, la iluminación, la generación de calor o electricidad mediante su uso en calderas, como combustible

para automóviles, turbinas, bombas de agua, cortadoras de pasto o en diferentes clases de motores, para la síntesis de productos químicos, y cuando se genera en gran cantidad, y es adecuadamente purificado, incluso puede ser inyectado a la red de gas natural (GIZ, MINENERGÍA, 2012; Martí Herrero, J, 2019).

Tabla 2. Equivalencia de biogás con otras fuentes de energía

Equivalencias energéticas del biogás	
1000 litros (1m ³) de biogás equivale a:	
Madera	1,3 kg
Bosta seca	1,2 kg
Alcohol	1,1 litros
Gasolina	0,8 litros
Gas-oil	0,65 litros
Gas Natural	0,76 m ³
Carbón	1,5 kg
Electricidad	2,2 Kw/h

Fuente: (Martí Herrero, J, 2008)

Es importante entender que el poder calorífico del biogás es menor al de las fuentes de gas fósiles, lo que implica que tareas como cocinar con biogás toman más tiempo que cuando se hace con gas natural o de cilindro. Pese a esto, en áreas rurales alejadas, en donde las fuentes energéticas de origen fósil son difíciles de conseguir, el biogás puede llegar a satisfacer necesidades tan básicas como cocinar, calentar o iluminar (FAO, 2011; Martí Herrero, J, 2008). En la tabla 3 se observan los consumos de biogás promedio para diferentes usos y artefactos.

Tabla 3. Consumos de biogás promedio para diferentes usos y artefactos

Usos & Artefacto	Consumo de biogás litros por hora (l/h)	Tiempo de funcionamiento (horas) con 1000 litros de biogás
Estufa doméstica	300	3,33
Estufa industrial	450	2,22
Calefactor de lechones	300	3,33
Lampara (60W)	120	8,33
Olla arrocera (2L)	140	7,14
Calefactor de agua (14kW)	2500	0,40
Refrigerador (100L)	30 en clima frío 75 en clima cálido	33,3 en clima frío 13,33 en clima cálido
Motor < 5HP (por cada 1HP)	400	2,50
Motor > 5HP (por cada 1HP)	250	4,00
Ordeñadora (15 HP)	2500	0,40
Generador (1.2) kW	600	1,67
Generador (3) kW	2100	0,48

Fuente: (Martí Herrero, J, 2019)

Como se observa en la Tabla 3, a partir de la combustión del biogás es posible generar calor o electricidad, aunque también existen sistemas combinados, o de cogeneración, que generan principalmente electricidad y calor de manera residual, o de manera opuesta, que producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. La ventaja de los sistemas combinados o de cogeneración es que aumenta la eficiencia del uso del biogás si se les compara con los que sólo producen electricidad o calor.

Los motores de combustión interna suelen ser muy utilizados para el aprovechamiento del biogás (Ilustración 2), y por ello es importante resaltar que el uso de biogás tanto en este tipo de motores como en cualquier otro, requiere de un proceso previo de limpieza, que permita bajar el contenido de vapor de agua (H_2O) y ácido sulfhídrico (H_2S) a niveles por debajo de las 100 ppm. Esto, con el fin de evitar la corrosión y el daño permanente en los motores. (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011).

Ilustración 2. Motor generador a biogás



Fuente: <https://www.aqualimpia.com/>



¿Cómo obtener biogás? La manera más sencilla de obtener biogás es a través del montaje de digestores anaeróbios o biodigestores (Ilustración 3). Los tipos de biodigestores y sus mecanismos de funcionamiento se verán con mayor detalle en el capítulo cuatro (4), pero por ahora diremos que la obtención de biogás, en principio, requiere sólo de estos reactores y de materia orgánica para alimentarlos.

La materia orgánica, también llamada sustrato, que se utiliza para alimentar el biodigestor, puede provenir de diferentes fuentes y procesos, por ejemplo, un biodigestor puede ser alimentado con estiércol de fincas ganaderas o granjas porcícolas, aunque

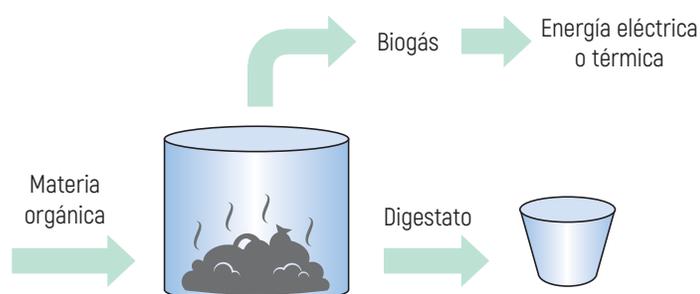
también puede alimentarse de excedentes de cosechas provenientes de la actividad agrícola, o de residuos y/o subproductos provenientes de diferentes industrias (Tabla 4). Los residuos o sustratos que se utilizarán para alimentar el biodigestor pueden procesarse de manera independiente o conjuntamente, cuando se tratan de manera conjunta, el proceso recibe el nombre de codigestión (GIZ, MINENERGÍA, 2012).

Tabla 4. Residuos orgánicos para la producción de biogás.

Residuo de origen animal	Estiércol, orina, camas, residuos de plantas de beneficio (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	Arvences, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	Caña de azúcar, palma, café etc.
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

Fuente: (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011)

Ilustración 3. Esquema básico del proceso de digestión anaerobia.



Fuente: (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

La decisión de tratar los residuos de manera conjunta o independiente, dependerá mucho de las posibilidades logísticas, técnicas, sociales y económicas que estén dadas en un contexto local determinado. Por lo general, la implementación de sistemas de producción de biogás colectivos, donde se vinculan varios grupos de agricultores, campesinos, industriales y otros actores, no se dan fácilmente, aunque sí pueden generar importantes beneficios y ahorros para los participantes, no sólo en el plano económico, sino también a nivel social y ambiental. Desde el punto de vista técnico, es importante entender que la eficiencia de los biodigestores alimentados con estiércol es superior a la de aquellos alimentados con residuos agrícolas, domésticos o agroindustriales. La razón, es que los consorcios bacterianos responsables por la generación de metano se encuentran muy bien conformados en el estiércol de distintos animales, mientras que cuando el sustrato a utilizar está compuesto por otro tipo de residuos orgánicos, estos consorcios requieren un tiempo adicional para conformarse y consolidarse al interior del biodigestor. Esta, entre otras razones hace deseable la implementación de procesos de codigestión (GIZ, MINENERGÍA, 2012).

2 El proceso de producción de biogás

La metanogénesis, y por tanto la producción de biogás que se dá al interior de los biodigestores, se produce en muchos ambientes naturales como lodazales, pantanos, sedimentos acuáticos, suelos húmedos, y por supuesto, en los sistemas digestivos de muchos animales. Lo que da origen a la producción de biogás, es la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, en unas condiciones de temperatura, pH, humedad y unos tiempos de degradación determinados (Rincón M. & Silvia L., 2014).

La digestión anaerobia, es un proceso que se subdivide en cuatro etapas: **hidrólisis**, **acidogénesis**, **acetogénesis** y **metanogénesis** (Ilustración 4). La **hidrólisis**, es la primera etapa del proceso, y donde ocurre la descomposición de la materia orgánica, de moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos, a compuestos más pequeños y sencillos como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Los compuestos solubles producto de esta hidrólisis, son metabolizados a dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), y a otros ácidos de cadena corta (ácidos grasos volátiles) durante la **acidogénesis**. Estos ácidos de cadena corta, durante la tercera fase denominada la **acetogénesis**, son convertidos en ácido acético. Por último, en el proceso de **metanogénesis**, las bacterias metanógenas transforman el ácido acético e metano (CH_4), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), dando por finalizado el proceso de digestión. (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011; Martí Herrero, J, 2019; Corrales, 2015).

Las bacterias que llevan a cabo todas y cada una de las fases descritas, se organizan en lo que se llama un consorcio bacteriano. Dentro de dicho consorcio, diferentes poblaciones de bacterias realizan su trabajo, en diferentes momentos y bajo distintas condiciones de operación. Los consorcios bacterianos son muy diversos y complejos, y varían de un digestor a otro, y de unas condiciones de operación a otras, lo que hace que no tenga sentido tratar de seleccionar un grupo bacteriano en particular. Lo importante de los consorcios, es que las bacterias en ellos se autoseleccionan y autorregulan de manera natural, y dependiendo de las condiciones que se dan al interior del biodigestor, como la temperatura, el pH, el nivel de humedad y la materia orgánica que ingresa, entro otras condiciones de operación (Martí Herrero, J, 2019).

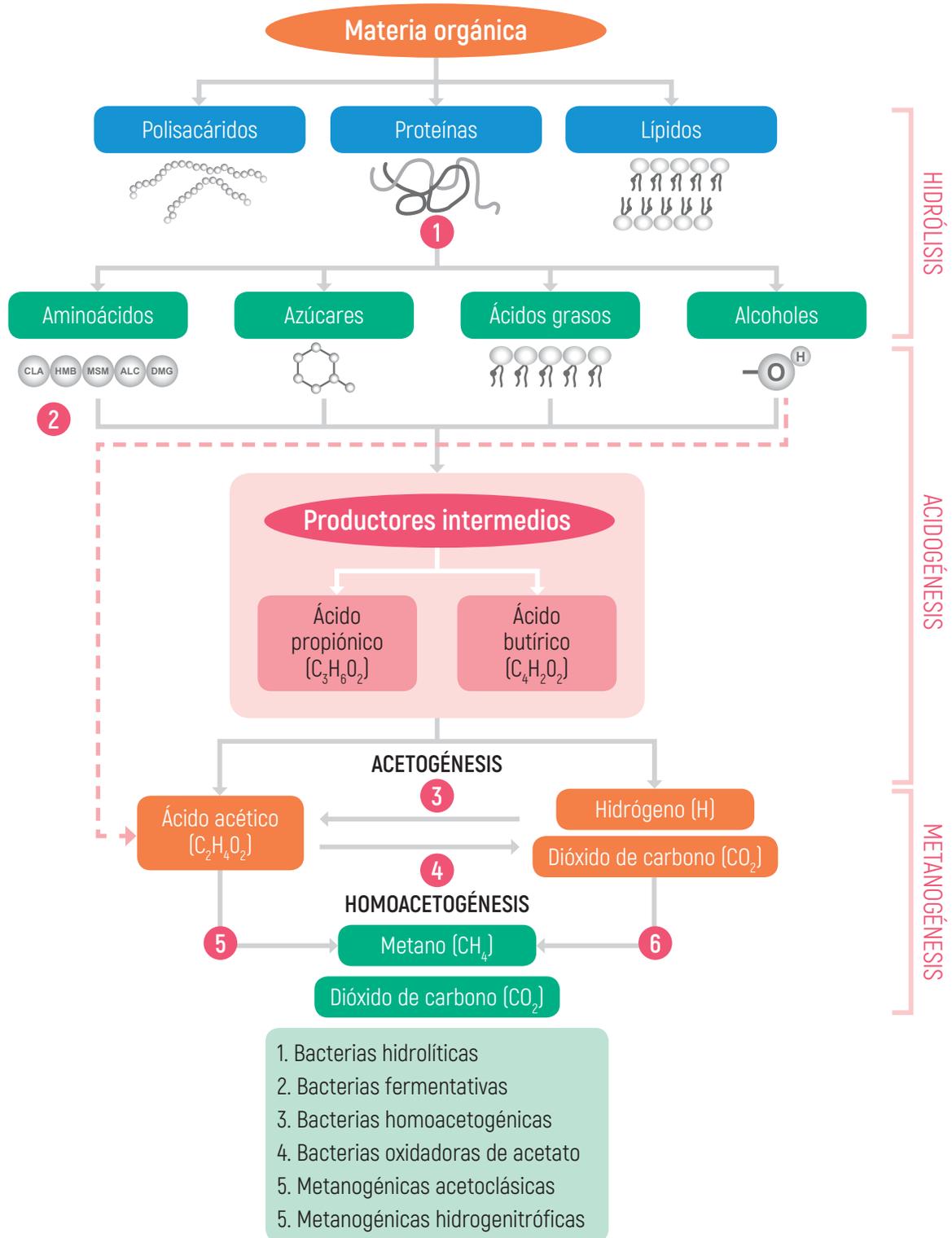


¿Qué factores intervienen en el proceso de biodigestión? Existen diversos factores que intervienen en el proceso de digestión anaerobia, entre ellos, la temperatura, el pH, la composición de la materia orgánica y los tiempos de retención. A lo largo del capítulo dos (2), veremos cada uno de estos factores con mayor detalle:

2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA

El tipo de materia orgánica o sustrato a utilizar se relaciona no sólo con la cantidad de metano que se obtendrá al final del proceso de biodigestión, sino con la calidad del

Ilustración 4. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos orgánicos



Fuente: (Corrales, 2015)

biogás que se produce. De hecho, hay una serie de parámetros que se pueden estimar para cada tipo de sustrato, y que nos indican que tan apto es dicho sustrato para la generación de biogás.

El biogás es el producto de una serie de reacciones en cadena, realizadas por un consorcio bacteriano que se conforma al interior del biodigestor. La capacidad de dichas bacterias para tomar unos compuestos y convertirlos en otros, depende de varias condiciones, y del tipo de sustrato que se utiliza para alimentar el reactor. La composición química de la materia orgánica que se utiliza, puede facilitar, bloquear, o hacer más lento y difícil el trabajo de los microorganismos. Las fuentes de carbono y nitrógeno fáciles de descomponer como grasas, proteínas y azúcares, ayudan al proceso de degradación, mientras que moléculas complejas y difíciles de romper como la lignina y la celulosa, presentes en materiales como el aserrín, las hojas y los restos de poda, no pueden ser utilizadas directamente por los microorganismos en el biodigestor, lo que implica la necesidad de tratamientos previos para romper estas complejas moléculas en moléculas más simples y pequeñas, para que así puedan ser metabolizadas por las bacterias del consorcio. En la tabla 5, es posible ver de manera comparativa la composición química de varios sustratos (FAO, 2011; GIZ, MINENERGÍA, 2012).

Tabla 5. Composición química de diversos residuos de origen animal (valores promedios, base seca)

Materia Prima	% Lípidos	% Proteínas	% Celulosa-hemicelulosa	% Lignina	% Ceniza
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95

Fuente: (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011)

Después de una fuente apropiada de energía, es decir de carbono (C), lo segundo más importante para las bacterias es que el nitrógeno (N) que debe estar presente en niveles adecuados, ya que es un elemento fundamental, no sólo para la formación de aminoácidos, proteínas y enzimas, sino para la formación de los ácidos nucleicos, que son la base de los procesos de reproducción celular. La presencia de otros elementos como el fósforo (P), el calcio (Ca), el potasio (K), el magnesio (Mg), y el azufre (S), son primordiales, al igual que la presencia de otros oligoelementos como el cobalto (Co), el níquel (Ni), el molibdeno (Mo), el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) que, aunque sólo se requieren en pequeñas cantidades, son indispensables para el correcto funcionamiento de cientos de proteínas, enzimas y procesos a nivel celular. En la tabla 6 se observan los niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011 ((FNR), 2010)).

Tabla 6. Niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal

Materia Prima	C [%]	N [%]	P ₂ O ₅ [%]	K ₂ O [%]	CaO [%]	MgO [%]
Bovino	17,4 - 40,6	0,3 - 2,0	0,1 - 1,5	0,10	0,35	0,13
Porcino	17,4 - 46,0	1,1 - 2,5	0,4 - 4,6	0,30	0,09	0,10
Aves	28,0 - 35,0	1,4 - 2,0	2,0 - 2,8	1,40	0,80	0,48
Equino	35,0 - 52,0	0,3 - 0,8	0,4 - 1,6	0,35	0,15	0,12
Ovino	35,0 - 46,0	0,3 - 0,6	0,3 - 1,0	0,15	0,33	
Caprino	35,0 - 50,0	1,0 - 2,0	0,2 - 1,5	2,30		

Fuente: (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011)

La relación carbono nitrógeno (C/N) más indicada para tener una buena digestión anaerobia es de treinta (30) unidades de carbono por una (1) de nitrógeno (30:1). Sin embargo, este indicador por sí sólo no permite saber la naturaleza del carbono, que como ya mencionamos, podría o no estar de forma disponible. Por ejemplo, cuando se trata de sustratos ricos en lignina. En la tabla 7 se presentan valores aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos animales (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011; Martí Herrero, J, 2019).

Tabla 7. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos animales

Residuo animal	%C	%N	C/N
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1

Fuente: (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011)



Señor porcicultor, para el desarrollo de un proyecto de generación de biogás a partir de porcínaza, es conveniente realizar el análisis químico de la misma, y conocer con exactitud los compuestos orgánicos contenidos (nutrientes), el potencial de metanización y las posibles deficiencias de macro y microelementos.

2.2. CONTENIDO DE AGUA, SÓLIDOS TOTALES (ST) Y SÓLIDOS VOLÁTILES (SV)

Como lo vimos en el apartado anterior, es importante caracterizar la materia orgánica que entra al biodigestor por su contenido nutricional, a fin de asegurar tanto la presencia de una fuente disponible de energía, como la de macro y micro elementos requeridos por las bacterias para realizar las cuatro fases del proceso de digestión anaerobia. En este apartado, veremos los parámetros que se usan para ajustar el nivel de humedad dentro del sistema, según el tipo de sustrato con que se pretende alimentar el reactor.

Los procesos de digestión anaerobia pueden ser húmedos o secos², dependiendo, entre otras variables, de un parámetro conocido como Sólidos Totales (ST). Dicho parámetro, es una medida que estima el porcentaje de materia seca que hay en un sustrato después de remover toda el agua que este contenga por medio de un proceso de evaporación. Los sólidos totales están conformados a su vez por los sólidos inertes y los sólidos orgánicos, siendo estos últimos, los sólidos degradables, también conocidos como sólidos volátiles, y los que en sí serán utilizados por las bacterias como fuente de alimento durante todo el proceso de fermentación anaerobia (Martí Herrero, J, 2019; Universidad San Buenaventura).

La medición de los sólidos totales y los sólidos volátiles se hace en laboratorio, aunque cabe mencionar que, para el estiércol de algunos animales, ya hay unos valores de referencia establecidos y que pueden usarse para tomar decisiones en materia de diseño y dimensionamiento (Tabla 8) (Martí Herrero, J, 2019; FAO, 2011).

Tabla 8. Contenido de sólidos totales (ST) promedio de diversos animales

Residuos animales	% Sólidos totales
Bovinos	13.4 - 56.2
Porcinos	15.0 - 49.0
Aves	26.0 - 92.0
Caprinos	83.0 - 92.0
Ovejas	32.0 - 45.0
Conejos	34.7 - 90.8
Equinos	19.0 - 42.9
Excretas Humanas	17.0

Fuente: (FAO, 2011)

No sobra decir que el contenido de agua en el biodigestor es fundamental para que las bacterias puedan desarrollar las rutas metabólicas que acaban en la generación de biogás, y para que en general, puedan sobrevivir, crecer, moverse y realizar todas

² Para mayor información sobre procesos de digestión húmeda y seca consultar: Universidad San Buenaventura. (s.f.). Análisis comparativo sobre las tecnologías de la digestión anaerobia húmeda y seca. Recuperado el 19 de Octubre de 2019, de Biblioteca digital Universidad San Buenaventura: http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/6131/1/An%C3%A1lisis%20comparativo%20sobre%20las%20tecnolog%C3%ADa_Stephanie%20Grisales%20R_2017.pdf

sus funciones biológicas. Algo que hay que tener en cuenta es que las bacterias meta-nogénicas se ven afectadas por el contenido de sólidos en el sustrato, y que por tanto, es importante asegurar un porcentaje adecuado de sólidos totales en la mezcla con la que se alimenta el biodigestor. Experimentalmente se ha demostrado que, en los biodigestores tipo salchicha o tubulares, los sólidos totales deben estar entre el 3% y el 16% para un óptimo funcionamiento (FAO, 2011).

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia orgánica, supondremos que tenemos 1 kilogramo de porcínaza con 20% de sólidos totales. Es decir que nuestros sólidos totales iniciales son de:

$$1 \text{ kg (porcínaza)} \times 20\% = 0,20 \text{ Kg (sólidos totales)}$$

Es decir:

$$1000 \text{ g (porcínaza)} \times 20\% = 200 \text{ g (sólidos totales)}$$

Sí queremos llegar a un 5% de sólidos totales, entonces:

$$\%ST \text{ (diluído)} = \frac{\text{Kg(excreta fresca)} * \%ST \text{ (porcínaza)}}{\text{Kg(excreta fresca)} + \text{litros(agua añadida)}}$$

Reemplazando:

$$5\% = \frac{1 \text{ Kg} * 20\%}{1 \text{ Kg} + \text{litros(agua añadida)}}$$

$$0,05 = \frac{1 \text{ Kg} * 20\%}{1 \text{ Kg} + \text{litros(agua añadida)}}$$

Despejando:

$$0,05 = \frac{0,20}{1 \text{ Kg} + \text{litros(agua añadida)}}$$

$$0,05 * (1 \text{ Kg} + \text{litros(agua añadida)}) = 0,20$$

$$0,05 + 0,05(\text{litros(agua añadida)}) = 0,20$$

$$\text{litros(agua añadida)} = \frac{0,20 - 0,05}{0,05}$$

$$\text{litros(agua añadida)} = \frac{0,15}{0,05} = 3 \text{ litros de agua añadida}$$

Esto quiere decir que por cada kilogramo de porcínaza fresca, se debe mezclar con 3 litros de agua para que la mezcla que entra al biodigestor tenga unos sólidos totales del 5% (FAO, 2011)

En general, entre mayor el porcentaje de sólidos totales (%ST), mayor será la cantidad de agua requerida para la dilución. En la tabla 9 se puede observar la relación estiércol-agua que se usa como referencia en la mayoría de textos sobre generación de biogás. En cualquier caso, cuantificar la cantidad de porcínaza que va a entrar al biodigestor, es fundamental para garantizar su funcionamiento. De hecho, se recomienda instalar un medidor de caudal (Ilustración 5) o realizar un aforo del tanque de almacenamiento de porcínaza³, para hacer más fácil el control del contenido de materia seca que genera la granja, la cantidad de agua que se requiere, y los sólidos totales que entran al reactor, y que idealmente deben estar entre un 3% y un 16% (Martí Herrero, J, 2019).

Tabla 9. Mezcla estiércol – agua (de referencia) para cargar el biodigestor

Estiércol	Relación estiércol - agua
Bovinos	(1:3) 1kilo de estiércol: 3 litros de agua
Porcinos	(1:4) 1kilo de estiércol: 4 litros de agua
Llama /Oveja/Cuy	(1:8-9) 1kilo de estiércol: 8 o 9 litros de agua

Fuente: (Martí Herrero, J, 2019)



Señor porcicultor, recuerde que cuando se tiene instalado un medidor de caudal, es importante llevar el registro del mismo para identificar sobrecargas u otras anomalías que puedan afectar la eficiencia del sistema de digestión anaerobia (Tabla 10).

Ilustración 5. Medidor de caudal



Fuente: <http://www.zenner-medidores.com/>

Tabla 10. Ejemplo para el registro del medidor de caudal

Fecha	Hora	Valor medidor (unidades)	Responsable	Observaciones
dd/mm/aa	##: ## am/pm	#####	Nombre del operario	

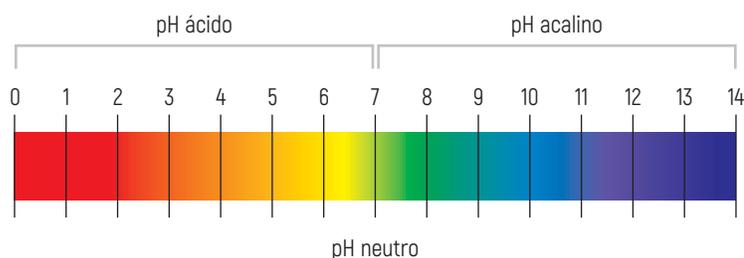
³ Para conocer la cantidad de porcínaza puede apoyarse en la metodología de un aforo volumétrico, la cual podrá consultar en: Porkcolombia-FNP. (2019). *Guía para la elaboración del programa para uso eficiente y ahorro de agua - PUEAA en el sector porcícola*. Recuperado de: https://www.miporkcolombia.co/wp-content/uploads/2019/06/GUIA_PUEAA_PORPCOLOMBIA.pdf

2.3. PH

Además de las características propias de la materia orgánica, que acabamos de ver, hay otras variables que afectan el proceso de fermentación anaerobia, como el pH, y que hay que conocer y controlar, en pro de asegurar que la calidad y cantidad del biogás que se genera sea la que deseamos.

El pH, es en sí mismo un indicador de la acidez que hay dentro del biodigestor, y su importancia radica en su capacidad para propiciar o bloquear ciertas reacciones químicas, de manera que se generen unos u otros compuestos en cada una de las etapas del proceso de digestión. Cuando entendemos cómo el pH incide en las diferentes etapas del proceso de digestión anaerobia, podemos utilizar los valores de pH que obtenemos como indicadores de los procesos y reacciones que se dan dentro del reactor (Ilustración 6).

Ilustración 6. Escala de pH



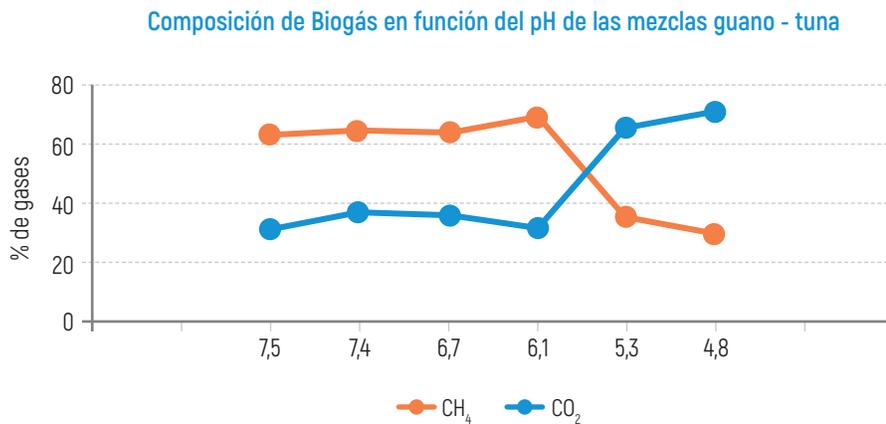
Fuente: <https://www.experimentoscientificos.es/ph/escala-del-ph/>

Para entender como el pH influye en el proceso de generación de biogás, es necesario recordar por un momento, que la digestión anaerobia se subdivide en cuatro etapas, y que las bacterias responsables de cada una de estas etapas conducen reacciones químicas que convierten unos compuestos en otros, dentro de una cadena de sucesiva transformación. Como lo vimos en el apartado dos (2), las bacterias responsables de la primera etapa, o de la etapa de hidrólisis, se encargan de romper moléculas complejas, como proteínas, carbohidratos y lípidos, en moléculas más sencillas, como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes, a través de una serie de reacciones que ocurren de manera óptima en unas condiciones de acidez que oscilan entre un pH de 4,5 y un pH de 6,3 (GIZ, MINENERGÍA, 2012). Las siguientes dos etapas, realizadas por bacterias acidogénicas y acetogénicas, se dan de manera óptima dentro de un rango de pH que va de 5,5 a 6,5, es decir, en condiciones más cercanas a la neutralidad. Finalmente, la metanogénesis, que es realizada por archeobacterias o bacterias metanógenas, ocurre sólo en condiciones neutro-alcalinas, en las que el pH dentro del biodigestor idealmente oscila entre 7,8 y 8,2 (Martí Herrero, J, 2019; FAO, 2011).

Para ilustrar como el pH puede llegar a influir en el proceso de digestión anaerobia, utilizaremos el caso de las bacterias metanógenas, que son las más susceptibles a los cambios de pH dentro del consorcio, y que cuando se encuentran en condiciones de pH menores de 6,0 (ácidas), disminuyen significativamente su actividad, generando por lo

menos dos importantes problemas dentro del biodigestor. El primero de ellos, es una menor producción de metano (CH_4) acompañada de una mayor generación de dióxido de carbono (CO_2), que hace que se produzca una menor cantidad de biogás, y que el biogás obtenido sea de menor poder energético, y por tanto, de menor calidad (Ilustración 7). El segundo problema, es que al disminuir la actividad metanogénica, se empieza a acumular ácido acético (e hidrógeno) dentro del biodigestor, alterando el equilibrio químico de las demás fases del proceso (acetogénesis, acidogénesis e hidrólisis), y llegando incluso a causar la falla completa del reactor (FAO, 2011).

Ilustración 7. Variación en la composición del biogás en función del pH



Fuente: (FAO, 2011)

Entendiendo que los pH óptimos para cada grupo dentro del consorcio bacteriano son diferentes, y que pequeños cambios en el pH pueden ser definitivos en la actividad de ciertos grupos bacterianos, podemos afirmar que no es recomendable en la implementación de ningún sistema de biodigestión de bajo costo, manejar el pH por debajo de 6,0, ni tampoco por encima de 8,0 con el fin de evitar que la cadena de reacciones químicas dentro del biodigestor se afecten de manera significativa, tal y como lo vimos en el ejemplo anterior.

Para la implementación de sistemas simples y de bajo costo, lo más fácil y recomendable es mantener unas condiciones de pH cercanas a la neutralidad, lo que quiere decir, con valores de pH entre 6,5 y 7,5 (Martí Herrero, J, 2019). En dicho rango de pH, la mayoría de las bacterias podrán adaptarse y trabajar, aunque no lleguen al punto óptimo para su máxima actividad.

Cuando los procesos son de gran escala, se pueden diseñar plantas de biogás que separan las fases de digestión en dos o más reactores, de manera que queden separadas las etapas ácidas, de las etapas que requieren mayor alcalinidad, el objetivo es proporcionar a cada grupo de bacterias el pH óptimo para su máxima actividad, logrando con ello mayor eficiencia en cada fase, reducción los tiempos de retención hidráulica, y por ende disminución en los tamaños de los reactores, lo que significa menores costos de implementación, cuando se trata, como ya lo mencionamos, de biodigestores a escala industrial.



Señor productor, una forma de verificar la estabilidad del biodigestor, es monitorear el valor del pH en la caja de salida del biól. Recuerde que este valor del pH debe estar entre 6,5 y 7,5.

2.4. TÓXICOS E INHIBIDORES DE LA METANOGÉNESIS

Como se ha explicado, la composición de la materia orgánica que entra al biodigestor, y el nivel de acidez (pH) que se genera dentro del mismo, son variables que pueden afectar el proceso de fermentación anaerobia, y por tanto la generación de biogás. En este apartado, revisaremos cómo la presencia de cierto tipo de sustancias puede llegar a hacer más lentos los procesos dentro del reactor, e incluso ser inhibitorias o tóxicas para los microorganismos.

Las sustancias tóxicas o inhibitorias que pueden llegar a presentarse en un biodigestor provienen, o bien del material orgánico que entra al reactor, o ser simplemente subproductos, o productos intermedios de reacciones dentro del biodigestor. Ejemplos de sustancias tóxicas o inhibitorias que pueden entrar al reactor con la materia orgánica que se usa para alimentarlo pueden ser: metales pesados, oxígeno, cianuro, antibióticos, desinfectantes, fenoles, amoníaco, y compuestos halogenados, entre otros. Dentro del segundo grupo de sustancias tóxicas o inhibitorias, y que se generan dentro del biodigestor, pueden mencionarse: sulfuros, sulfatos, amoníaco, hidrógeno y ácidos grasos volátiles entre otros compuestos que generan inhibición. (FAO, 2011; GIZ, MINENERGÍA, 2012). La Tabla 11 Muestra una lista de varios de estos inhibidores, y su efecto sobre los microorganismos, las reacciones, o sobre el proceso mismo de biodigestión.

Tabla 11. Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y concentraciones perjudiciales

Inhibidor	Concentración de inhibición	Comentarios
Oxígeno	> 0,1 mg/l	Al ser el proceso de biodigestión un proceso anaerobio por principio, la presencia de oxígeno (O ₂) se considera tóxica, sobre todo para el grupo de bacterias metanógenas, que son anaerobias obligadas.
Sulfuro de hidrógeno	> 50 mg/l H ₂ S	Las bacterias metanógenas son sensibles a la presencia de la forma no ionizada de los sulfuros (H ₂ S), por lo que un aumento en el nivel de esta sustancia (> 50 mg/l) puede generar una baja actividad de las metanógenas, o incluso el colapso de esta comunidad microbiana, y la no producción de metano (CH ₄) en el reactor. Los pH ácidos y bajas temperaturas generan un aumento en la actividad de bacterias productoras de H ₂ S.
Ácidos grasos volátiles - AGV	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	El aumento en la concentración de AGV, desestabiliza y rompe el equilibrio entre la acidogénesis y la metanogénesis, e incluso puede llegar a colapsar el funcionamiento del reactor. A medida que los AGV se acumulan, el pH se hace más ácido, y la actividad de las metanógenas disminuye al punto de no generar más metano (CH ₄). La acumulación de hidrógeno puede llegar a tener el mismo efecto sobre el proceso de digestión.

Inhibidor	Concentración de inhibición	Comentarios
Nitrógeno de amoníaco	> 3.500 mg/l NH_4^+ (pH = 7,0)	El nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) puede entrar al biodigestor a través del material de alimentación, o puede formarse dentro del sistema. El amonio (NH_3) y su forma iónica (NH_4^+) se mantienen en equilibrio dinámico dentro del reactor, variando en su concentración según el pH. Cuando el material que entra al biodigestor es muy rico en nitrógeno, los niveles de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) aumentan, a medida que el pH se vuelve más alcalino y la temperatura más alta. Es importante mencionar que el efecto tóxico se relaciona con la forma NH_4^+ y que en concentraciones menores d 1500(mg/L) no hay efectos adversos.
Metales pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Los metales solubles tienen un efecto inhibitorio mayor que el de los metales insolubles. Para bloquear el efecto tóxico de las formas solubles, se propicia la formación de sulfuros metálicos que terminan precipitándose al fondo del reactor.
Desinfectantes, antibióticos	No especificado	Efecto inhibitorio especificado en cada producto.

Fuente: Tomado y modificado de ((FNR), 2010)



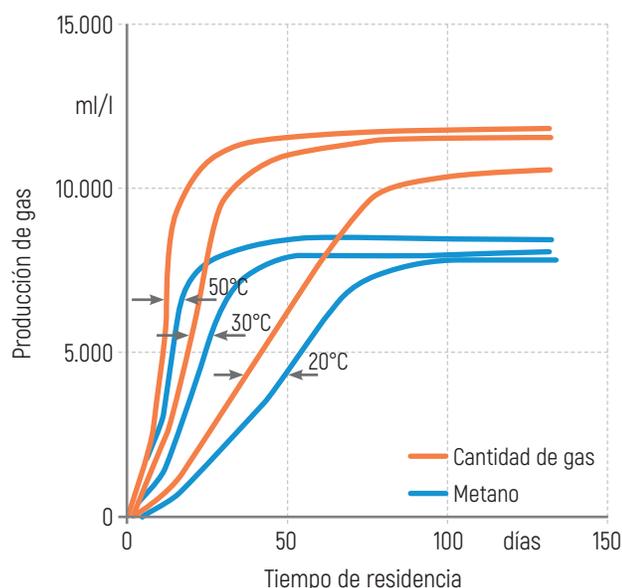
Señor productor, evite que agua de lavado con jabones, desinfectantes o material orgánico proveniente de animales en tratamiento antibiótico entren al biodigestor.

2.5. TEMPERATURA

La temperatura es una variable que se relaciona, de manera directa o indirecta, con prácticamente todas las actividades que ocurren dentro del biodigestor. Por ejemplo, con la velocidad de los procesos, con el crecimiento de los microorganismos, con la capacidad de los mismos para metabolizar compuestos, también con la estabilidad de muchas moléculas y procesos, con muchos aspectos fisicoquímicos, y con la forma y disponibilidad de muchos compuestos que están, o se forman, dentro del reactor.

De manera general, podemos decir que la eficiencia de un biodigestor se relaciona directamente con la velocidad a la que se reproducen los microorganismos dentro del mismo, y con la capacidad que cada grupo, dentro del consorcio bacteriano, puede realizar las rutas metabólicas propias de cada fase del proceso de biodegradación. De manera muy similar a lo que se vio en la sección sobre pH, las bacterias tienen temperaturas óptimas distintas para llegar a su máximo de actividad, y en muchos casos, estar muy por encima, o muy por debajo de su rango óptimo, puede generar problemas en el proceso de digestión. En la ilustración 8, es posible ver cómo la temperatura influye sobre la velocidad de degradación, y sobre la producción de gas (GIZ, MINENERGÍA, 2012).

Ilustración 8. Temperaturas del proceso de digestión anaeróbica



Fuente: (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

Según las temperaturas a las que trabajan las bacterias (Tabla 12), estas se pueden clasificar en: psicrófilas, si su rango de trabajo está por debajo de 25°C; mesófilas, si trabajan mejor entre los 32°C y 42°C; y termófilas cuando su óptimo está entre los 50°C y 60°C ((FNR), 2010; FAO, 2011). Pese a las ventajas o desventajas que pueda tener cada grupo, las más estudiadas y con las que más se trabaja, es con las del grupo que opera en el rango mesofílico. Trabajar dentro del rango termofílico, si bien hace que los procesos sean más rápidos, y contengan menos microorganismos potencialmente patógenos, es un proceso mucho más inestable y requiere de reactores más complejos y costosos. Se recomienda para el diseño de reactores de digestión anaerobia de bajo costo, la inclusión de mecanismos que no permitan variaciones en la temperatura del biodigestor de más de 1,2°C/día⁴ (FAO, 2011).

Tabla 12. Rangos de temperatura de los diferentes grupos de bacterias

Fermentación	T. Mínima °C	T. Óptimo °C	T. Máximo °C
Psicrófilica	4 – 10	15-18	20-25
Mesofílica	15 – 20	25-35	35-45
Termofílica	25– 45	50-60	75-80

Fuente: (FAO, 2011)

⁴ Se recomienda revisar el capítulo sobre diseño de sistemas de calefacción solar pasiva en: Martí Herrero, J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación. Ecuador: Redbiolac. (pg 38-40).



Señor porcicultor, recuerde que un biodigestor que opera a 25 °C o menos producirá menos biogás que el mismo sistema operando por encima de los 32°C. Si se encuentra en clima templado o frío y desea optimizar la producción de biogás, considere consultar el documento Martí Herrero, J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación.

Ecuador: Redbiolac. (pg 38-40).

2.6. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) Y VELOCIDAD DE CARGA (VCO)

En línea con la sección anterior, entre más alta la temperatura, menor es el tiempo que las bacterias necesitan para completar el proceso de degradación, y por tanto, menor el tiempo que el sustrato requiere estar en el reactor, es decir, menor tiempo de retención hidráulica (THR). Como norma general podría decirse que, a mayor temperatura, menor tiempo de retención y volumen del reactor requerido, y en sentido contrario, que a menor temperatura, mayor tiempo de retención y mayor volumen del reactor requerido (Tabla 13). El volumen del reactor es importante porque entre más grande sea, mayor será el costo de implementación.

Tabla 13. Relaciones de referencia entre temperaturas y tiempos de retención

Temperatura °C	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) días
35	25-30
30	30-40
25	35-50
20	50-65
15	65-90
10	90-125

Fuente: (Martí Herrero, J, 2019)

La relación entre tiempo de retención hidráulica (TRH), volumen neto del biodigestor (V_B) y volumen del sustrato alimentado por día (V_S) es la siguiente (GIZ, MINENERGÍA, 2012).

$$\text{El tiempo de retención hidráulica THR (días)} = \frac{V_B (m^3)}{V_S (m^3 / \text{día})}$$

De la misma manera,

$$\text{El volumen de sustrato diario } V_S (m^3 / \text{día}) = \frac{V_B (m^3)}{TRH (\text{días})}$$

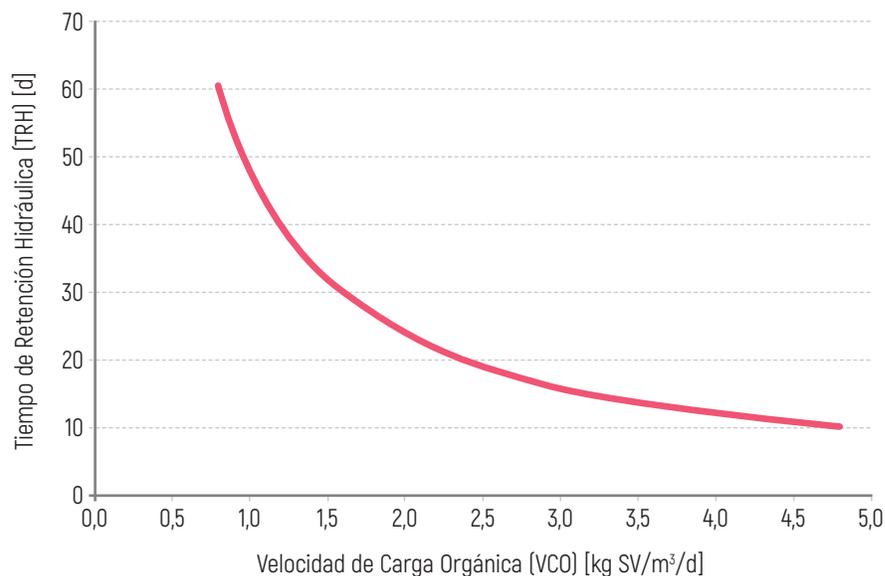
En la anterior ecuación es posible ver que el tiempo de retención hidráulica (TRH), tiene una relación inversa con el volumen de sustrato que se carga diariamente en el biodigestor (Vs). Lo que quiere decir, por ejemplo, que un biodigestor de tipo continuo con un tiempo de retención estimado de 30 días, podrá ser cargado con 1/30 del volumen del biodigestor cada día (FAO, 2011).

Para el diseño y dimensionamiento de cualquier biodigestor, además del tiempo de retención hidráulica (TRH) es necesaria la estimación de la *Velocidad de Carga Orgánica (VCO)*, que se define como la cantidad de materia orgánica que entra al biodigestor por unidad de volumen (m³) y por unidad de tiempo (día), y que depende del tipo de sustrato que se va a utilizar, pues como lo señalamos en el apartado 2.2, no es igual el tiempo de degradación de un sustrato compuesto por carbohidratos, grasas y proteínas cortas, sencillas y fáciles de degradar, que el compuesto por moléculas más pesadas, complejas y difíciles de romper e hidrolizar (FAO, 2011).

Como también se mencionó en el apartado 2.2, la cantidad de materia orgánica presente en un sustrato se estima por su contenido de sólidos totales (ST) y/o de sólidos volátiles (SV), que son valores que pueden obtenerse o bien a través de pruebas de laboratorio, o utilizando valores de referencia, si dichos valores existen para el sustrato que vamos a utilizar (tabla 14). Con estos valores de laboratorio o referencia, la velocidad de carga orgánica (VCO) puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Velocidad de Carga Orgánica (VCO)} = \frac{\text{Kg SV}}{\text{m}^3 * \text{día}}$$

Ilustración 9. Correlación entre la tasa de carga orgánica y el tiempo de retención para la porcinaza



Fuente: (Kaiser, 2017)

Cuando la velocidad de carga orgánica (VCO) es alta, el tiempo de retención hidráulica (TRH) se acorta y viceversa. La relación entre estas dos variables puede observarse en la Ilustración 9, en donde es posible ver que entre más tiempo de retención hidráulica (TRH) necesitamos, menos velocidad de carga orgánica (VCO) podemos dar a nuestro biodigestor.

Los parámetros velocidad de carga orgánica (VCO), temperatura y tiempo de retención hidráulica (TRH) son los que se utilizan para el dimensionamiento del biodigestor y por tanto los que determinan su tamaño. Es importante no perder de vista que entre más grande el biodigestor, más costoso será, por lo que el objetivo de un buen dimensionamiento debe ser lograr una óptima degradación de la materia orgánica al menor costo. De cualquier forma, no hay que olvidar que un biodigestor muy pequeño puede acortar los tiempos de retención, causando que los microorganismos no alcancen a degradar el sustrato de manera adecuada, y afectando con ello, tanto la producción de biogás, como la calidad del biól que probablemente presente problemas de olores.

Tabla 14. Características generales de los sustratos comunes más utilizados en proyectos de biogás

Sustrato	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)	Rendimiento de biogás		Fracción de metano
	%	%ST	m ³ /t MF*	m ³ /t SV	%
Purín vacuno	8-11	75-82	20-30	200-500	60
Purín porcino	Aprox. 7	75-86	20-35	300-700	50-70
Estiércol vacuno	Aprox. 25	68-76	40-50	210-300	60
Estiércol porcino	25	75-80	55-65	720-450	60
Guano de Ave	Aprox. 32	63-80	70-90	250-550	60

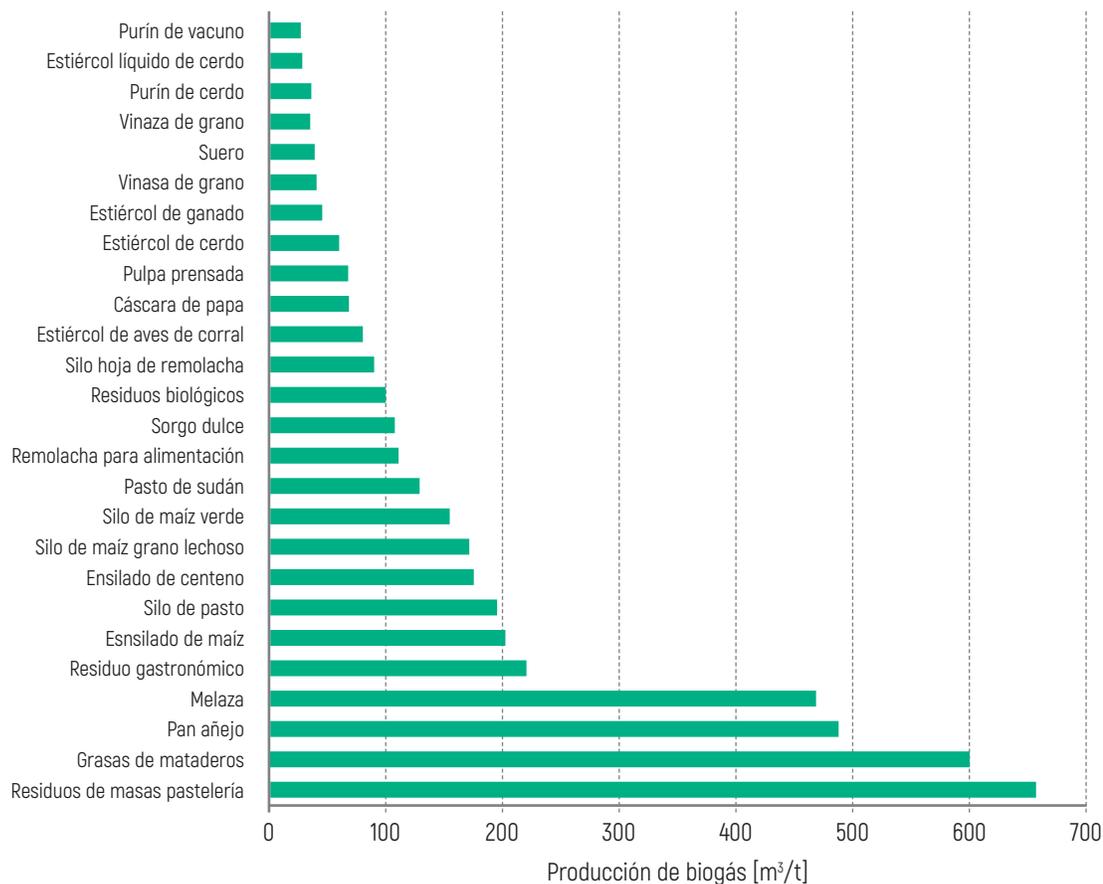
*Materia Fresca

Fuente: (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

3 Potencial de generación de biogás en la porcicultura

El potencial energético de un sustrato determinado depende de su contenido de sólidos volátiles (SV), y de la manera en que se desarrolle el proceso de digestión. Para el caso de la biomasa generada en las granjas porcícolas, el potencial energético varía, dependiendo de si se utiliza estiércol sólido, estiércol líquido (principalmente orina), o una mezcla de estiércol, orina y agua de lavado a la que comúnmente se le denomina porcínaza. Se calcula que una tonelada de estiércol de cerdo puede generar hasta 60 m³ de biogás, mientras que una tonelada de purín puede generar 36 m³ de biogás y una tonelada de estiércol líquido (orina) sólo 25 m³ de biogás. En la ilustración 10 se puede comparar el potencial energético de diferentes biomazas generados en diferentes procesos agropecuarios.

Ilustración 10. Rendimiento medio en biogás de diferentes materias primas



Fuente: (Erler, 2009) (Kaiser, 2017)



¿Cómo estimar el potencial de biogás de la porcínaza? Existen diversas formas de estimar el potencial de biogás de una biomasa. Una de ellas es conociendo la composición de la biomasa a través de pruebas de laboratorio y realizando pruebas de fermentación, y otra, es usando referentes

bibliográficos que estiman el potencial bioquímico de metanización a partir del análisis composicional de la biomasa que se quiere evaluar. Dichos estimados bioquímicos pueden ser de sólidos totales (ST) y/o sólidos volátiles (SV), de composición elemental (C, O, H, N)⁵, también de composición de fracciones orgánicas (grasas y aceites, proteína, lignina y carbohidratos), entre otros. En las secciones 3.1 y 3.2; se describirán dos procedimientos sencillos y rápidos para estimar el potencial de producción de biogás a partir de porcínaza, y se utilizarán ejemplos para facilitar la comprensión.

3.1. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS VOLÁTILES

Paso 1. Conocer el inventario actual de la granja y el peso promedio por grupo etéreo.

Tabla 15. Ejemplo sobre inventario de granja porcícola

Grupo etéreo	Número de animales (N_i)	Peso Promedio (kg) = peso salida - peso entrada (P_{Promi})
Lechones lactantes	80	6 - 1 = 5
Precebo	180	30 - 6 = 24
Levante	90	65 - 30 = 35
Ceba	90	110 - 65 = 45
Hembras de reemplazo	18	180 - 60 = 120
Hembras de cría	22	250*
Machos	1	300 - 60 = 240

*Se considera peso promedio de las hembras en gestación y en lactancia.

Paso 2. Estimar la masa ganadera (M) de la granja y su equivalente en unidad animal. (1 AU: 113,7 kg peso vivo) de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

$$M = \sum_i^n N_i * P_{Promi} \text{ (Ecuación 1)}$$

Usando los datos de la tabla 15 obtenemos la masa ganadera (M):

$$M = (80 * 5) + (180 * 24) + (90 * 35) + (90 * 45) + (18 * 120) + (22 * 250) + (1 * 240) = 19.820 \text{ kg} = 19,82$$

El número de Unidades animales (UA) promedio se calcula dividiendo la masa ganadera en el peso vivo promedio (AU:113,7kg)

$$UA = \frac{M}{113,7 \text{ kg}} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$UA = \frac{19.820 \text{ kg}}{113,7 \text{ kg}} = 174,32 \text{ UA}$$

⁵ C: Carbono, O: Oxígeno, H: Hidrógeno y N: Nitrógeno

El número de Unidades animales (UA) promedio de esta granja es de 174,32

Paso 3. Estimar la cantidad de porcinaza (E) generada en la granja. Teniendo en cuenta que cada unidad animal (UA) genera aproximadamente 19 toneladas de porcinaza al año, podemos obtener la cantidad de porcinaza en la granja de acuerdo a la ecuación 3.

$$E = UA * 19 \text{ t/año (Ecuación 3)}$$

$$E = 174,32 * 19 \text{ t/año} = 3.312 \text{ t/año}$$

La cantidad de porcinaza (E) generada en la granja en el año es de 3.312 toneladas en el año.

Paso 4. Estimar la cantidad de sólidos volátiles (SV) presentes en la porcinaza. Según la tabla 14, la porcinaza tiene aproximadamente 7% de materia seca, pero para este ejercicio consideraremos un 6%, además de un 80% de sólidos volátiles y 20% de cenizas. Para el cálculo de los sólidos volátiles (SV) de la granja en el año, reemplazamos los valores en la ecuación 4 así:

$$SV = \%SV * \%MS * E \text{ (Ecuación 4)}$$

$$SV = 0,8 * 0,06 * 3.312 \text{ t/año} = 158,98 \text{ t/año}$$

La cantidad de sólidos volátiles (SV) presentes en la porcinaza es de 158,98 toneladas en el año.

Paso 5. Estimar la cantidad de biogás (B) que se puede producir a partir de los sólidos volátiles disponibles en la porcinaza. Teniendo en cuenta que cada kilogramo de sólidos volátiles puede generar hasta 400 litros de biogás, con un 60% de contenido de metano (CH₄), reemplazamos en las ecuaciones 5 y 6 y obtenemos que:

$$B = SV * 1.000 \text{ kg} * 400 \text{ l/kg}_{SV} \text{ (Ecuación 5)}$$

$$B = 158,98 \text{ t/año} * 1.000 \text{ kg/t} * 400 \text{ l/kg}_{SV} = 63'592.000 = 63.592 \text{ m}^3$$

$$CH_4 = B * 0,6 \text{ (Ecuación 6)}$$

$$CH_4 = 63.592 \text{ m}^3 * 0,6 = 38.155 \text{ m}^3$$

La cantidad de biogás (B) que se produce a partir de los sólidos volátiles (SV) calculados para esa cantidad de porcinaza es de 63.592 m³ de los cuales 38.155 m³ son de metano (CH₄). Lo que equivalente a 104,5 m³ al día de metano, si la digestión anaerobia se lleva a cabo en un biodigestor de flujo continuo, dimensionado y operado correctamente.

3.2. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA REMOCIÓN DE DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO).

Paso 1. Conocer el inventario actual de la granja. Para este ejemplo se considera el mismo inventario de la tabla 15 ($N = 481$).

Paso 2. Estimar la cantidad de porcínaza que se genera en la granja. Se debe tener en cuenta que cada cerdo genera aproximadamente 11 litros de porcínaza al día de acuerdo a la ecuación 7.

$$E = N * 11 \text{ l/día (Ecuación 7)}$$

$$E = 481 * 11 \text{ l/día} = 5291 \text{ l/día} = 5,29 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Paso 3. Caracterizar afluente (porcínaza de entrada) en términos de DQO. Para el presente ejercicio se supone que el efluente tiene una DQO de 20.000 mg/l. Un biodigestor diseñado y operado correctamente, debe estar en la capacidad de remover entre el 80 y 90% de la DQO presente en la porcínaza. Por lo tanto, la DQO en el efluente debe estar entre 4.000 y 2.000 mg/l. Es decir, la remoción de la DQO debe estar entre 16.000 mg/l (16 kg/m³) y 18.000 mg/l (18 kg/m³).

Paso 4. Estimar el biogás producido. Suponiendo una remoción del 80% de la DQO presente en la porcínaza, y que cada kilogramo de DQO removido genera 0,35 m³ de biogás, con un contenido de metano del 60%. Reemplazamos en la ecuación 8 y obtenemos que:

$$B = DQO_{rem} * E * 0,35 * 1,60 \text{ (Ecuación 8)}$$

$$B = 16 \text{ kg/m}^3 * 5,29 \text{ m}^3 / \text{d} * 0,35 \text{ m}^3 / \text{kg}_{DQO_{rem}} * 1,60 = 47,4 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Entonces, para el inventario evaluado en el presente ejercicio (481 cerdos en una granja de ciclo completo), el potencial es de 46,7 m³ al día, suponiendo una remoción del 80% de la DQO de una porcínaza que entra con 20.000 mg/l de DQO, a un biodigestor de flujo continuo dimensionado y operando correctamente.

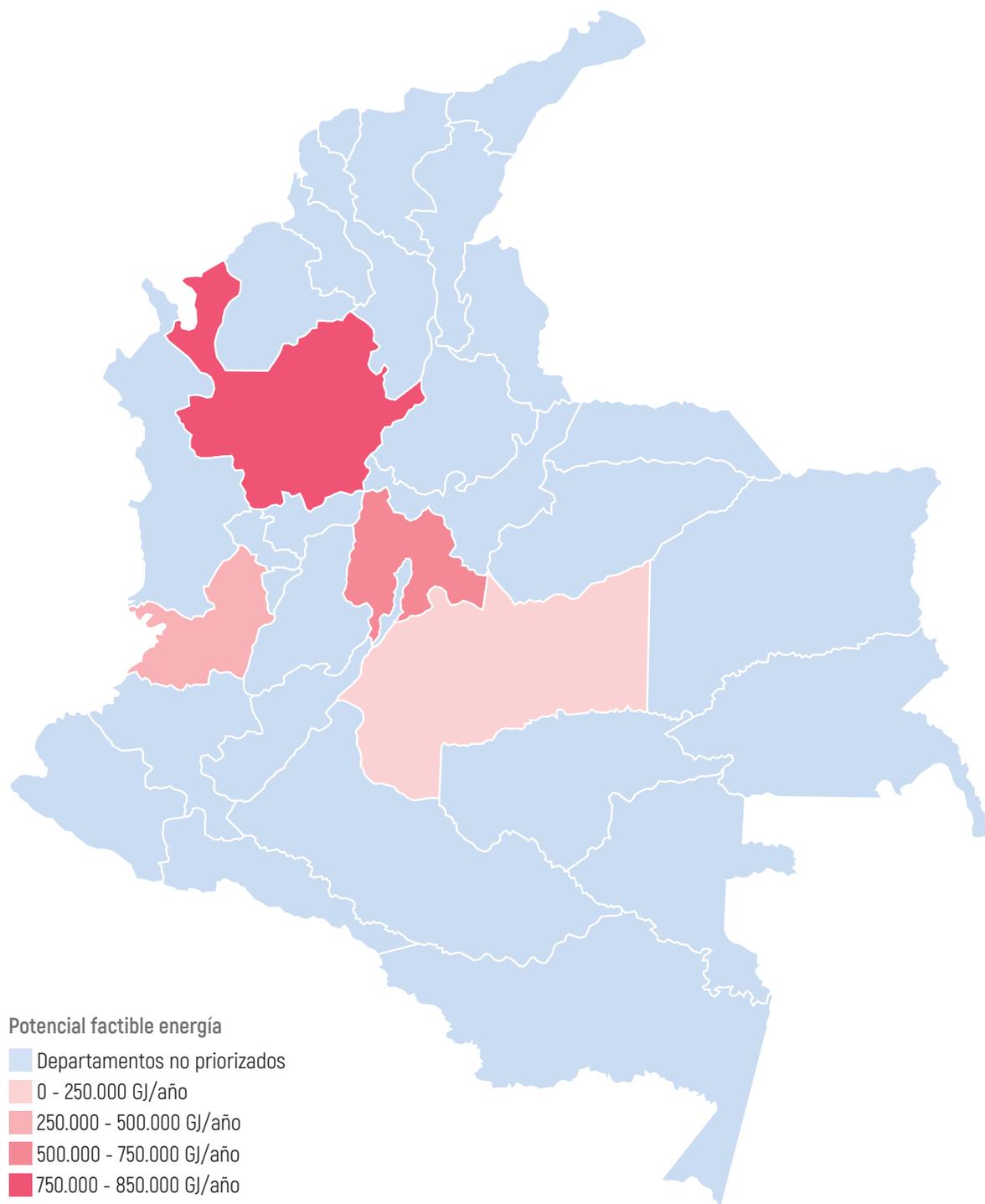


¿Cuál es el potencial energético del sector porcícola en Colombia?

Si consideramos que el inventario tecnificado de cerdos en Colombia es de cerca de 6,5 millones de animales según cifras del censo ICA (2018), y que el potencial estimado de generación de biogás a partir de porcínaza es cercano al 1.500.000 GJ/año (Ilustración 11), podemos afirmar con toda tranquilidad, que el sector porcícola tiene mucho que aportar al potencial de generación energética del país, y a elevar el potencial actualmente instalado de 40 MW que se reporta provenientes del aprovechamiento de distintos tipos de biomasa, y en un alto porcentaje de la biomasa utilizada para la generación de bioetanol (UPME, 2016; Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018). Como puede verse en la Ilustración 12, la porcínaza es una de las biomásas priorizadas para la generación de biogás en el país, no sólo por su potencial

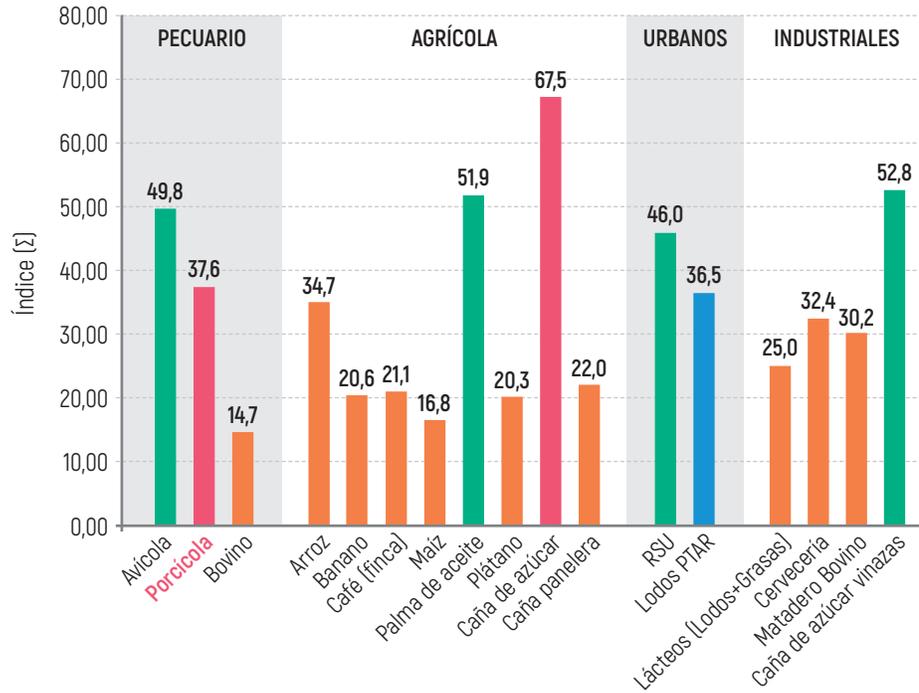
de generación de biogás a nivel teórico, sino por las posibilidades técnicas, logísticas y en general prácticas para utilizar dicho biogás para alimentar las redes interconectadas que ya existen a nivel nacional. En el Anexo 1 se encuentran tabulados los potenciales energéticos por departamento (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018).

Ilustración 11. Potencial factible de generación de biogás a partir de porcinaza



Fuente: (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018)

Ilustración 12. Biomásas residuales priorizadas para generación de biogás



Fuente: Tomado y modificado de (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018)

4 Tipos de biodigestores

El biodigestor es el principal elemento en donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Todos los digestores anaerobios mantienen el estiércol en ausencia de oxígeno y generan unas condiciones favorables para que crezcan consorcios de microorganismos indispensables para la formación de metano. La diferencia fundamental entre la amplia variedad de digestores anaerobios que existen, es que, el proceso en cada uno de ellos ocurre de una manera sutilmente diferente, lo que se debe principalmente a su manera de funcionar, a su forma, y a los materiales que se utilizan para su construcción. Los biodigestores pueden tener diferentes formas, ser sistemas pasivos, de alta o baja velocidad, y estar contruidos con materiales distintos que van desde el polietileno de alta densidad (PEAD), pasando por geotextiles, tipo PVC, hasta ladrillos, concreto, o metales como el acero inoxidable (Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF, 2011; Doug Hamilton, 2019).

Los digestores anaerobios se clasifican, diseñan e implementan dependiendo de la escala del proceso que se pretende llevar (continuo, semi-continuo o discontinuo), el presupuesto que se tiene (bajo costo o alto costo), y de las condiciones climáticas, topográficas y de disponibilidad de terreno. Dado que la operación óptima de los biodigestores se da a una temperatura de 35°C, ocurre con mucha frecuencia que, en algunos climas y condiciones se hace necesaria la adecuación de sistemas de calefacción que eleven la temperatura del biodigestor, y de la misma manera, y dependiendo del sustrato o materia orgánica que se utilice para alimentar el biodigestor, de la implementación de mecanismos de agitación que eviten la formación de costras en el fondo, o natas en la superficie de la fase líquida, que interfieran con el normal funcionamiento del sistema (Martí Herrero, J, 2019).

La implementación de sistemas de calefacción y agitación, incrementa tanto los costos de implementación como los de mantenimiento, lo que, dependiendo del tipo de usuario, puede llegar a ser inconveniente.

Como el objetivo de esta guía en particular es orientar al pequeño y mediano productor a la tecnología de digestión anaerobia, este documento se enfoca en los sistemas de biodigestión de tecnología intermedia, de funcionamiento semi-continuo y de bajo costo⁶, de manera que el productor interesado pueda decidir la mejor opción disponible de acuerdo con sus necesidades.

4.1 REACTORES ANAEROBIOS DE FUNCIONAMIENTO SEMI-CONTINUO Y DE BAJO COSTO

Los biodigestores semi continuos, son los sistemas más utilizados alrededor del mundo, por sus características de fácil acceso, instalación y bajo costo. Se componen principalmente de una cámara de fermentación, donde ocurre el proceso de digestión anaerobia, de un

⁶ Para aquellos productores que quieran más información sobre sistemas de tecnología más avanzada o a escala industrial, les sugerimos la revisión de textos como: GIZ, MINENERGÍA. (2012). Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de Ministerio de energía Gobierno de Chile: <http://www.minenergia.cl/biogaslechero/wp-content/uploads/2015/12/guiaplanificacionproyectosbiogasweb.pdf>

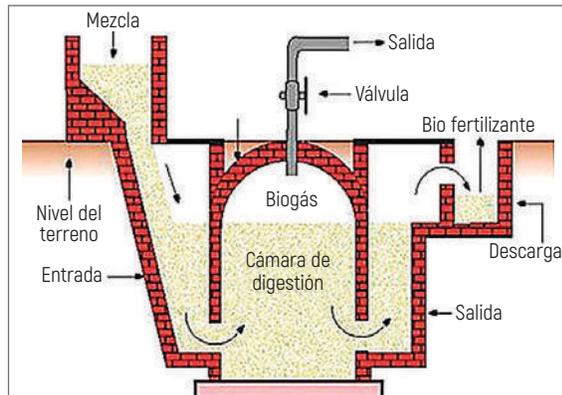
espacio (domo o campana) en la parte superior para el almacenamiento del gas, y de un par de cajas, de entrada y salida, para alimentar el biodigestor y sacar el bio-abono. Dentro de este grupo de biodigestores; se distinguen por su popularidad tres modelos: el modelo chino o de cúpula fija (Ilustración 13); el modelo hindú o de campana flotante (Ilustración 14), y el modelo Taiwán o de flujo continuo (Ilustración 15). A continuación, describiremos brevemente los dos primeros modelos, y profundizaremos en el tercero, dado que es el que más encontramos en el país, y el que mejores resultados y menores costos tiene para su implementación.

Ilustración 13. Biodigestor tipo chino



Fuente: (Martí Herrero, J, 2019)

Ilustración 14. Biodigestor tipo hindú



Fuente: (Cursos CPT, s.f.)

Ilustración 15. Biodigestores tipo Taiwán



Fuente: Porkcolombia-FNP

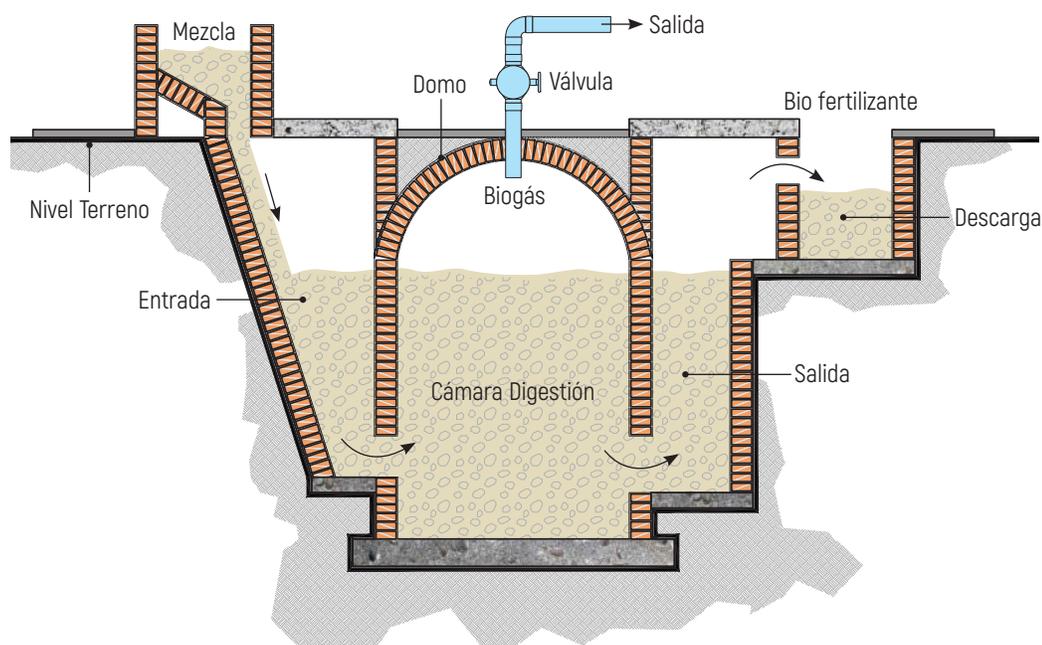


4.1.1 Biodigestor tipo chino o de cúpula fija

Este modelo de biodigestor se compone de una cámara de digestión con techo en forma de domo, y dos tanques conectados a la cámara, uno para la entrada, o alimentación del biodigestor con la mezcla de materia orgánica y agua, y otro, para la salida del biol. El biogás se acumula en la parte superior de la cámara de digestión anaerobia, y sale a través de un tubo que se conecta con una válvula de seguridad, y que continúa hacia el lugar de aprovechamiento, donde será utilizado el biogás. A diferencia de los otros dos modelos,

este se encuentra completamente enterrado, y es más eficiente para el tratamiento de aguas y la producción de bio-abono, que para la producción de biogás. En promedio un biodigestor de este tipo requiere entre 30 y 60 días para la completa digestión del sustrato (Ilustración 16) (FAO, 2011).

Ilustración 16. Biodigestor tipo chino



Fuente: (García Páez)

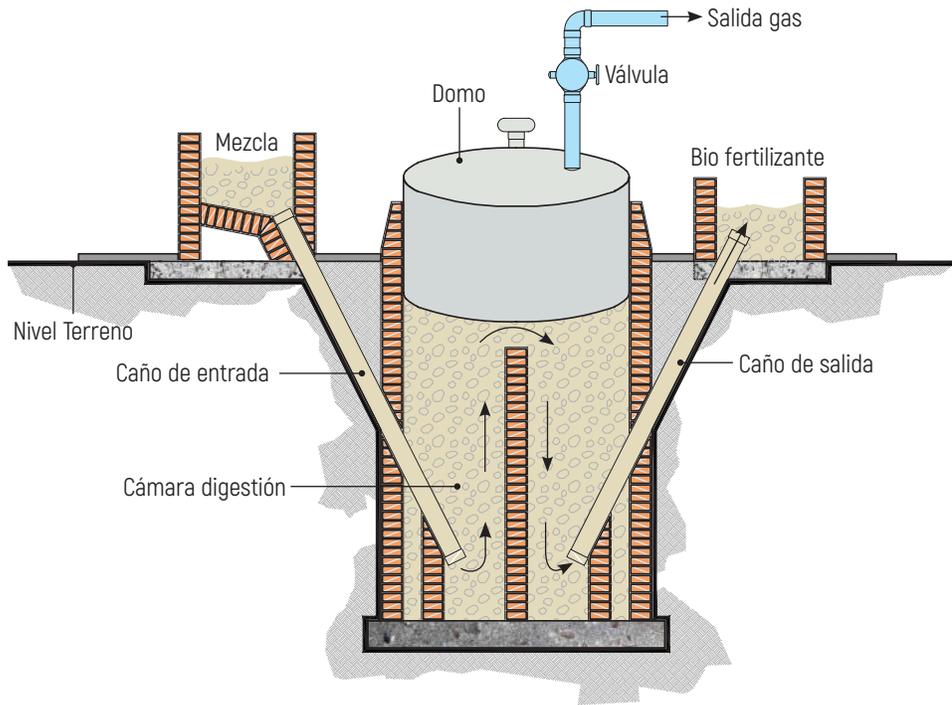
4.1.2 Biodigestor tipo hindú o de campana flotante

A diferencia del modelo anterior, el biodigestor tipo hindú está semi-enterrado, y consta de un tanque o reactor vertical, muy similar a un aljibe o pozo, y de una campana flotante o gasómetro, generalmente metálica, para acumular el biogás y generar presión constante, lo que es muy deseable para la operación de los equipos y sistemas que se alimentan con dicho biogás. De manera similar al biodigestor chino, este modelo también tiene una caja de entrada para alimentar el biodigestor, y una caja de salida por donde sale el bio-abono en un volumen equivalente al que se introduce en la caja de entrada. A diferencia del modelo chino, este sistema es mucho más eficiente para la producción de biogás (Ilustración 17) (Cursos CPT, s.f.).

4.1.3 Biodigestor tipo Taiwán o de flujo continuo

El biodigestor tubular de flujo continuo o tipo Taiwán, es el sistema más económico de los tres modelos estudiados, porque a diferencia de los demás, está elaborado en plástico o geotextil, y no requiere de mucha mano de obra, o de la compra de materiales como cemento, ladrillos, varillas, y otros elementos de construcción que incrementan los costos

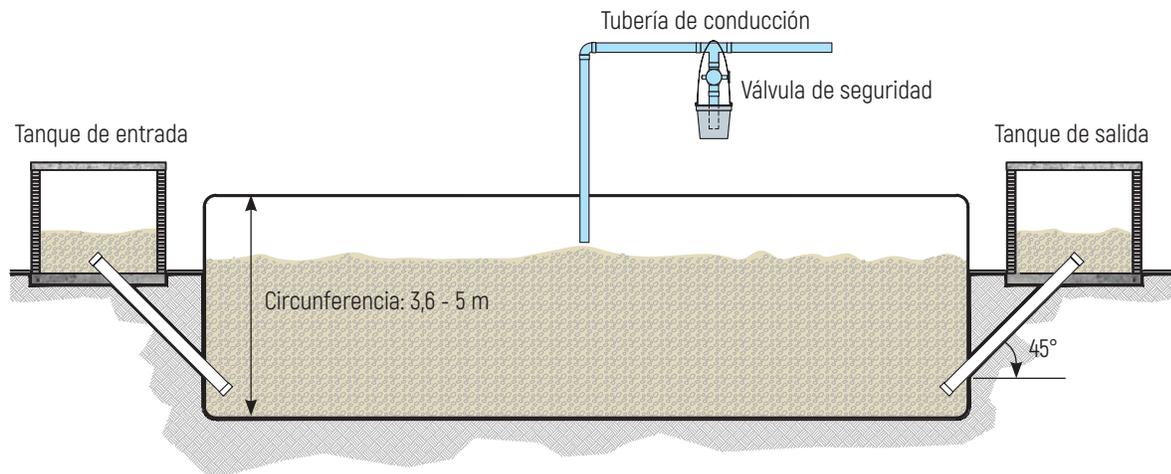
Ilustración 17. Biodigestor tipo hindú



Fuente: (García Páez)

de implementación. El biodigestor tubular de flujo continuo se construye generalmente semi-enterrado, pero a diferencia de los dos anteriores, la zanja es menos profunda, lo que implica que no requiere de complejos sistemas de contención, o de recubrimientos en materiales costosos como el cemento para garantizar la estabilidad de los taludes (Ilustración 18).

Ilustración 18. Biodigestor tipo Taiwán



Fuente: Tomado y adaptado de: (Kinyua, Rowse, & Ergas, 2016)

A diferencia de los otros, el biodigestor de flujo continuo aprovecha la radiación solar para subir la temperatura dentro de la cámara de fermentación, y para mantener el calor dentro del sistema, lo que hace que el proceso de digestión anaerobia sea mucho más rápido y eficiente, disminuyendo los tiempos de retención (TRH). Finalmente, un punto importante de resaltar es que, a diferencia de los modelos chino e hindú, este modelo se puede adaptar para trabajar en climas fríos, y por ello es uno de los sistemas más utilizados en Latinoamérica y en Colombia (Martí Herrero, J, 2019).

Antecedentes

Los biodigestores tubulares de flujo continuo o tipo Taiwán, se han desarrollado y difundido desde los años setenta y ochenta en los llamados “países en vía de desarrollo”, debido principalmente a los altos costos y dificultad de construcción propios de los modelos rígidos de digestión. El origen de los biodigestores tubulares de bajo costo, se remonta a 1981 con el modelo “barro rojo PVC” diseñado por Pound en Taiwán, y a partir de ahí; se desarrollaron otros modelos de biodigestores tubulares flexibles de flujo continuo como el de Preston en Etiopía, el de Botero en Colombia (1987) y el de Bui Xuan An en Vietnam (1994), todos ellos, aprovechando las ventajas térmicas que ofrecían los países de clima tropical (RedBioLac, s.f.).

En Colombia, los biodigestores de flujo continuo son los sistemas que más encontramos, y los de mayor difusión. Algunas organizaciones como la Fundación CIPAV en Cali, han llegado a desarrollar diseños propios de biodigestores plásticos de flujo continuo, conocidos como biodigestores de plástico tubulares tipo CIPAV, que son interesantes de analizar, por la profundidad de su desarrollo a nivel investigativo, por su sencillez, su adaptación al contexto rural colombiano, y porque han sido aplicados con frecuencia en el sector porcícola (Chará Orozco, 2002). Sin embargo, el trabajo del CIPAV no es el único que se ha desarrollado, por el contrario, cada día hay más trabajos de investigación y desarrollo sobre esta tecnología; que se enfoca en facilitar la implementación por parte del productor. La Agencia de cooperación técnica alemana (GTZ) y la Red de Biodigestores Para Latino América y el Caribe (RedBioLac), son ejemplos de otras organizaciones que han venido desarrollando procesos de investigación, producción y difusión de documentos muy completos, y que enriquecen y complementan cada día más el conocimiento que se hay sobre los sistemas de biodigestión⁷.

Aspectos a tener en cuenta durante la instalación del biodigestor

A continuación, se describirán de manera general, algunos de los aspectos que se deben tener en cuenta durante la implementación de un biodigestor de flujo continuo, independientemente de que sea el productor quien lo construya, o de que contraten la construcción con alguna casa comercial.

⁷ Se recomienda la lectura del último documento producido por *Jaime Martí Herrero* y difundido por la RedBioLac, y que profundiza en temas de diseño del sistema de digestión anaeróbica tubular. Martí Herrero, J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación. Ecuador: RedBioLac.

Ubicación de la zanja

La ubicación de la zanja o fosa, es una de las decisiones más importantes en la implementación de un biodigestor. Idealmente el sistema debe construirse sobre un terreno firme y sin peligros de derrumbamiento, alejado del paso de vehículos, y donde el nivel freático no sea alto para evitar posteriores problemas de inundación. En zonas de topografía quebrada, la zanja debe quedar ubicada a través de la pendiente y no con ella, para evitar posteriores inconvenientes con los tiempos de retención. El piso de la zanja no debe tener un desnivel mayor al 0.5% de un extremo al otro, aunque el nivel de instalación del biodigestor debe permitir que la porcínaza llegue por gravedad, evitando trabajo adicional para el proceso de carga, o costos adicionales en el proceso de llenado. Es muy importante que el biodigestor quede ubicado muy cerca de las instalaciones donde se genera la porcínaza, de manera que el llenado del sistema no genere trabajos adicionales, y que por el contrario, sea una parte más de las instalaciones facilitando el proceso de limpieza y lavado (Chará Orozco, 2002 (Martí Herrero, J, 2019)). Además de los anteriores, deben contemplarse otros factores adicionales como la cercanía del biodigestor al lugar de uso del biogás, la cercanía a los sitios de uso o almacenamiento del biol, y la facilidad para tomar el agua que se requiere para los procesos de mezcla y de llenado (FAO, 2011).

Dimensionamiento de la zanja y del biodigestor

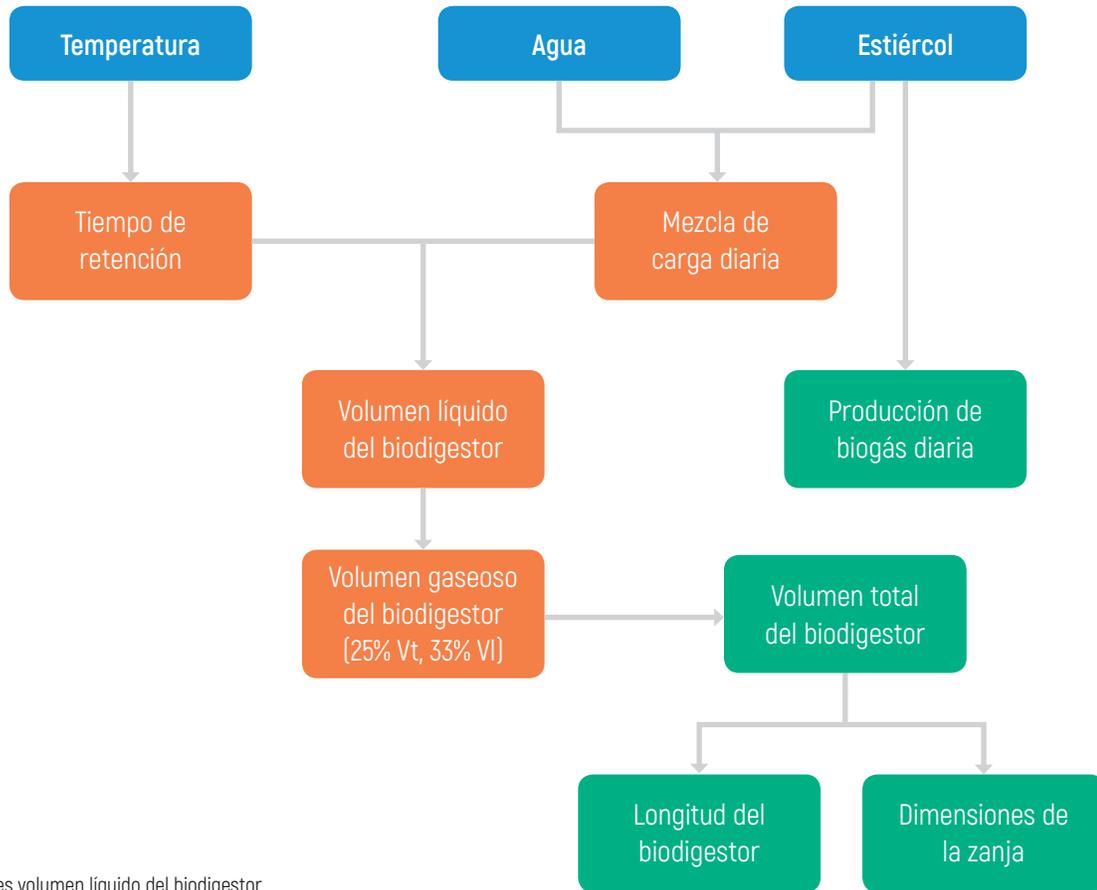
El diseño es un paso determinante en el proceso de implementación de un biodigestor, al punto que, un mal diseño puede conducir al colapso del sistema, y al fracaso de la iniciativa del productor. Autores como Jaime Martí Herrero han desarrollado varios trabajos⁸, que vale la pena consultar, puntualmente en materia de diseño y dimensionamiento. A través, de la esquematización metodológica del proceso de diseño han logrado facilitar la comprensión del mismo como se observa en la ilustración 19.

La ilustración 18, no es más que la interconexión de los temas vistos en el apartado dos, y su utilización para el dimensionamiento del biodigestor y la zanja. Como se vio en la sección 2.6, el tiempo de retención hidráulica (TRH), es el tiempo que requiere la materia orgánica dentro de la cámara de digestión para descomponerse, y depende de la temperatura a la que trabajará el biodigestor. De la misma manera, y según lo visto en las secciones 2.2 y 2.6, la cantidad de estiércol que diariamente se utiliza para alimentar al biodigestor, determina la cantidad de agua requerida y el volumen de mezcla diaria que ingresa al sistema, lo que junto con el tiempo de retención sirve para determinar el volumen líquido del biodigestor, que no es otra cosa que la cantidad máxima de líquido que cabe en la cámara de digestión durante los días requeridos para su completa descomposición. Conociendo el volumen líquido y la cantidad de estiércol diario que entra al sistema, podemos saber la cantidad de gas que puede generar el biodigestor (los cálculos pueden repasarse en la sección tres de la guía). Cuando se

⁸ Para profundizar en el tema de diseño y dimensionamiento se recomienda consultar:

- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación*. Ecuador: Redbiolac.
- Martí Herrero, J. (2008). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. Bolivia: GTZ PROAGRO.

Ilustración 19. Esquematación de la metodología para el dimensionamiento de un biodigestor de flujo continuo



*VI es volumen líquido del biodigestor

Fuente: Tomado y adaptado de (Martí Herrero, J, 2008)

tienen claros los volúmenes de líquido y de gas que se tendrán dentro del biodigestor, es posible saber el volumen total que hay que alojar en el plástico, y a partir de ahí definir las dimensiones tanto del plástico como de la zanja.

Debe evitarse, en el dimensionamiento de la zanja, que esta sea demasiado ancha o demasiado estrecha, para que el biodigestor no pierda la forma cilíndrica, ni el líquido sobresalga de la fosa interfiriendo con el espacio para el almacenamiento del gas o con los procesos de entrada y salida de la fase líquida. No es recomendable dejar el hueco hecho, ni postergar la instalación del biodigestor, ya que los taludes pueden desestabilizarse, por infiltración o inundación, haciendo que cambie el tamaño de la fosa, y generando huecos que después pueden deformar el biodigestor, llegando incluso a formar arrugas o tabiques que pueden interferir con el funcionamiento del mismo (Martí Herrero, J, 2019; Martí Herrero, J, 2008; Chará Orozco, 2002)

Las cajas de entrada y salida, también son fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema, una de sus principales funciones es servir como sello de agua para garantizar condiciones anaerobias al interior de la cámara de digestión (Chará

Orozco, 2002) y cuando están bien construidas, también sirven para verificar la limpieza y correcta mezcla del material que entra a la cámara de digestión.

Finalmente, es importante decir que un biodigestor puede diseñarse en función de la cantidad de materia orgánica que se quiere procesar al día, o en función de la cantidad de gas que se quiere obtener, o del abono que se quiere producir. Según se defina este objetivo, se puede determinar la mezcla diaria que se debe preparar y, dependiendo de la temperatura del sitio donde está el biodigestor, se sabrá el tiempo de retención que se debe asegurar. Una vez hemos definido estos datos, podemos diseñar el biodigestor tal y como se acaba de explicar.

Características del plástico y preparación de la bolsa

En la actualidad existen varios tipos de plásticos que pueden ser usados para la construcción de biodigestores, pero los más utilizados son: por un lado, los plásticos de invernadero, hechos en polietileno de calibre 8 (de 200 a 300 micrones de espesor), y que deben tener protección UV para que no se cristalicen, y por otro, los geotextiles o sistemas de geomembrana, que vienen elaborados en PVC o polietileno, y que están disponibles en grosores que oscilan entre los 500 y los 1500 micrones (Chará Orozco, 2002; Martí Herrero, J, 2019). En la tabla 15, se observan algunas de las características más relevantes de las diferentes opciones (Tabla 16).

Tabla 16. Característica de los plásticos más utilizados para el montaje de biodigestores tubulares

Tipo de plástico	Características
Plástico de Invernadero	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de conseguir • De bajo costo • El grosor es de 200 a 300 micrones • Viene de forma tubular y en lámina [se recomienda comprar el de forma tubular] • No es muy resistente por cuanto puede rasgarse durante el almacenamiento, el transporte o durante la manipulación. • La protección UV es opcional, se recomienda siempre adquirir el plástico con protección UV para alargar la vida del biodigestor. • La vida útil puede oscilar entre 2 y 4 años cuando no se protege del sol, y cuando se protege puede llegar a los 10 años. • Pueden venir en color negro o en colores transparentes claros • Pueden ser hechos de material reciclado.
Geomembrana de PVC	<ul style="list-style-type: none"> • No se consigue en cualquier ferretería, pero puede conseguirse con relativa facilidad en almacenes especializados. • Su costo es mayor que el del plástico de invernadero • Grosor entre 750 y 1500 micrones • Viene en láminas de 1 y 2 metros de ancho • Para dar la forma tubular al biodigestor es necesario soldar las láminas [termo-sellado] • El proceso de termo-sellado requiere de maquinaria específica y personal calificado • Es un material resistente por tanto no suele dañarse con facilidad. • La zona de la geomembrana expuesta al sol y al calor puede presentar hinchazones, por lo que también se recomienda protegerla de la radiación solar directa. • La vida útil sin protección solar oscila entre 5 y 10 años, y con protección puede ser de más de 20 años. • Generalmente son de color plomo, pero hay de varios colores • Se puede expandir, lo que hace que el biodigestor pueda acumular mucho biogás.

Tipo de plástico	Características
Geomembrana de polietileno	<ul style="list-style-type: none"> • No se consigue en cualquier ferretería, pero puede conseguirse con relativa facilidad en almacenes especializados. • Su costo es mayor que el del plástico de invernadero • Grosor entre 500 y 1500 micrones • Viene en láminas de 7 metros de ancho • Para dar la forma tubular al biodigestor es necesario soldar las láminas (termo-sellado) • El proceso de termo-sellado requiere de maquinaria específica y personal calificado. Generalmente se hace en el sitio de instalación del biodigestor. • Es más dura y menos flexible que las anteriores, es un material de difícil manipulación • Al ser más dura y rígida su empaque, almacenamiento y transporte es más difícil • No requiere protección solar • La vida útil sin protección solar es de más de 20 años. • Siempre son de color negro

Fuente: Tomado y adaptado de (Martí Herrero, J, 2019)

El dimensionamiento del biodigestor debe ser el adecuado, evitando que el plástico sea demasiado largo, y forme arrugas o tabiques que puedan llegar a dividir la cámara de digestión, ni demasiado corto, como para que no llegue a las paredes de las cajas y termine desgarrándose (Chará Orozco, 2002). La preparación del plástico, debe hacerse en una superficie plana, limpia, libre de piedras, ramas, herramientas u objetos que puedan dañarlo, sobre todo cuando se utiliza plástico de invernadero, en cuyo caso, se recomienda el uso de doble plástico tubular⁹.

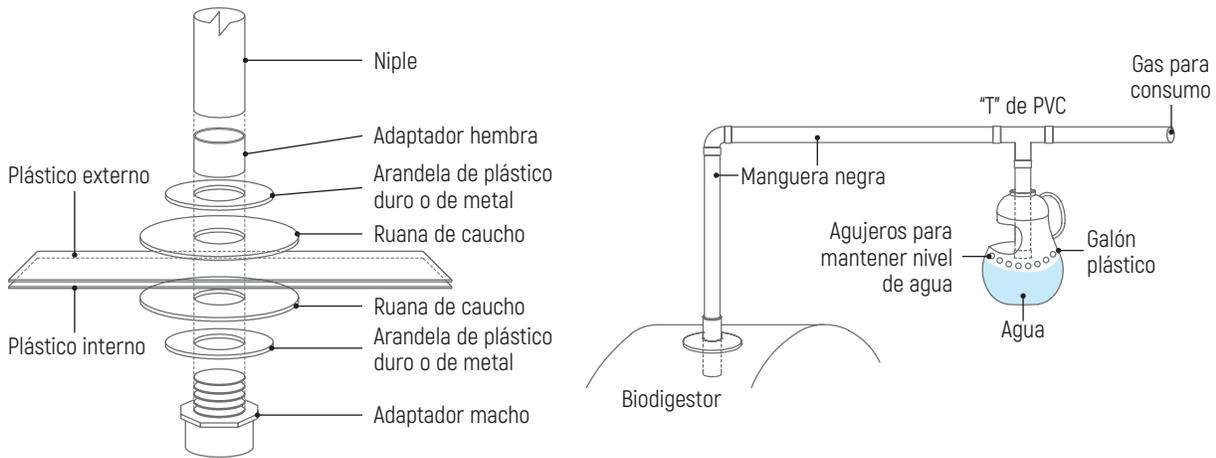
Instalación de la salida del biogás y de la válvula de seguridad

La salida del biogás puede ubicarse a uno o dos metros de la entrada del biodigestor, o aproximadamente en la mitad de la longitud de la bolsa. Para su instalación se utilizan arandelas de plástico o metal inoxidable, ruanas de caucho (arandelas hechas de neumático), adaptadores macho y hembra de PVC, y un niple que conecta con la tubería que lleva a la bolsa de reservorio del gas. Para la instalación se hace un orificio de aproximadamente $\frac{3}{4}$ de pulgada que atraviesa las dos bolsas tubulares, o la geomembrana, el adaptador macho se introduce por la parte interna del biodigestor, previa colocación de la arandela y la ruana de neumático. Una vez la rosca del macho ha atravesado el plástico se instala la otra ruana y arandela, y se procede a enroscar y a ajustar la hembra de PVC. El niple se conecta con la hembra de PVC en el exterior de la bolsa (Chará Orozco, 2002) (Ilustración 20).

La función de la válvula de seguridad es formar un sello de agua que impida la salida del biogás a bajas presiones, pero que evite la explosión del biodigestor o la ruptura del plástico en caso de exceso de presión. Esta válvula se conecta cerca al biodigestor y entre éste y la tubería de conducción a la bolsa de almacenamiento (Ilustración 16). El uso de la válvula, además de seguridad, ayuda al mantenimiento de la misma presión

⁹ Es decir insertar un plástico dentro del otro, y teniendo cuidado de evitar la presencia de aire entre las dos capas de plástico y las perforaciones accidentales durante el proceso.

Ilustración 20. Instalación de salida del biogás y válvula de seguridad



Fuente: Tomado de: (Chará Orozco, 2002)

Ilustración 21. válvula de seguridad



Fuente: (Martí Herrero, J, 2019)

en todo el sistema (Chará Orozco, 2002; Martí Herrero, 2007). La presión de biogás dentro del biodigestor será determinada por la cantidad de centímetros que la tubería se sumerge en el agua. Entre más centímetros la presión es mayor (Ilustración 21).

Bolsa de reservorio y conducción del biogás

La bolsa de reservorio se utiliza cuando el sitio de consumo del biogás está lejos del sitio donde está el biodigestor, o cuando el consumo de biogás es a una tasa menor que su generación. La conducción del biogás puede hacerse con manguera de polietileno de entre 1 y 1½ pulgadas dependiendo del tamaño del biodigestor. Se recomienda el uso de tubería de poca rugosidad, para que disminuya la fricción, permitiendo un paso más fácil del gas. No se recomienda enterrar la tubería, ya que esto puede hacer que haya condensación de agua dentro del tubo, y que se obstruya la salida del gas. También se debe tener cuidado de evitar ondulaciones en la tubería por la misma razón (Chará Orozco, 2002). Como la presión del biogás usualmente es baja, la selección de la manguera debe ayudar a evitar pérdidas de presión. La bolsa o reservorio de biogás idealmente debe ubicarse cerca de la cocina, y en un espacio protegido bajo techo. Estos reservorios facilitan el almacenamiento y ayudan a dar presión al biogás que posteriormente se utilizará para cocinar, iluminar o calentar (RedBioLac, s.f.; Martí Herrero, 2007).

Problemas en los procesos de instalación y operación de biodigestores de pequeña y mediana escala.

En las tablas 17, 18 y 19 veremos los principales problemas que se presentan durante la instalación y operación de biodigestores de pequeña y mediana escala.

Tabla 17. Fallas en materiales de construcción y sus causas.

Falla	Causa
Material muy susceptible de ruptura	Plástico muy delgado/ Falta de cerramiento en las instalaciones.
Material muy difícil de manipular	Plástico muy grueso o de mala calidad
Imperfecciones en la lámina de plástico	Mala fabricación del plástico
Cristalización o ruptura del material	Material sin protección UV
Orificios en el material	Falta de cuidado en el empaque, transporte y/o almacenamiento
Oxidación de arandelas en las válvulas de salida	Uso de material inadecuado
Fractura de arandelas en la instalación	Uso de material inadecuado
Ruptura de correas de amarre del plástico	Uso de correas muy deterioradas o delgadas

Fuente: (Chará Orozco, 2002)

Tabla 18. Fallas en el proceso de instalación y sus causas.

Falla	Causa
Ruptura mecánica del plástico en la preparación e instalación de la bolsa.	<ul style="list-style-type: none"> • Partículas u objetos corto punzantes en la superficie donde se extiende la bolsa • Manipulación del plástico en cercanía de objetos o herramientas agudas, o con personas con uñas largas. • Ruptura por alambres u otros objetos en el transporte de la bolsa hacia la fosa. • La persona que se introduce en la bolsa lleva objetos que la puedan dañar.
Ruptura por objetos cortantes en la fosa	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de raíces, piedras u otros objetos agudos en las paredes o el piso de la fosa
Fuga de líquido en los sitios de amarre de los tubos	<ul style="list-style-type: none"> • Técnica de amarre inadecuado
Biodigestor torcido y con pliegues en la superficie que reducen la capacidad de almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Colocación inadecuada de la bolsa en la fosa • Falta de cuidado en el llenado inicial del biodigestor
Salida de biogás floja o desajustada	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de presión o herramientas adecuadas en la instalación de la salida del biogás • Dilatación de los materiales por la temperatura • Los adaptadores macho y hembra no se acoplan adecuadamente

Fuente: (Chará Orozco, 2002)

Tabla 19. Fallas en el funcionamiento y sus causas.

Falla	Causa
Derrumbamiento de las paredes de la fosa sobre el biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> • Terreno inadecuado para la construcción • Tránsito de vehículos pesados muy cerca a la fosa
Poca efectividad en la descontaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño subestimado del biodigestor • Sobrecarga de animales con respecto del número usado en el cálculo para el diseño • Exceso de carga del biodigestor
Poca producción de biogás	<ul style="list-style-type: none"> • Poca carga de material orgánica • Exceso de dilución del material por entrada de aguas lluvias, o fuga de agua en bebederos u otras tuberías • Uso de agua en exceso para el lavado • Adición accidental de productos tóxicos como desinfectante y/o antibióticos • Baja temperatura ambiental • Escapes de gas en la tubería de conducción, en la válvula de salida o en la válvula de seguridad
Ruptura mecánica de la bolsa	<ul style="list-style-type: none"> • Animales caídos accidentalmente dentro de la fosa • Daño intencional • Cortes al momento de desmalezar en las proximidades del biodigestor • Caída de ramas u otros objetos
Cristalización del plástico y ruptura de la bolsa	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de exposición solar
Sedimentación de material dentro de la bolsa	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de arena y otros materiales al biodigestor
Formación de capa superficial o "nata" dentro del biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de material fibroso en la alimentación del biodigestor.
Salida de biogás por las cajas de salida y entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de gas dentro del biodigestor • Formación de capa fibrosa superficial o "nata" dentro del biodigestor • Bajo nivel de líquido dentro del biodigestor
Filtración de agua desde las cajas hacia la fosa	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de recubrimiento de las cajas en su parte interna • Presencia de grietas en las cajas
Rebose del material por la caja de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Salida del efluente en la caja de salida más alto que en el borde de la caja de entrada • Carga muy rápida del material
El biodigestor está lleno de biogás, pero este no sale en la estufa o sitio de consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de agua en la manguera de conducción • Manguera de diámetro muy reducido • Grandes distancias entre el biodigestor y el sitio de consumo

Fuente: (Chará Orozco, 2002)

Mantenimiento, cuidados y duración de los biodigestores tubulares

Los biodigestores de flujo continuo son sistemas fáciles de implementar y de bajo costo, pero a la vez son sistemas frágiles que requieren de unos cuidados mínimos para garantizar su adecuado funcionamiento y su duración (RedBioLac, s.f.). Por ejemplo, en materia de plásticos, independientemente del material que se utilice, si no se protege de manera adecuada, se pueden abrir agujeros y rasgaduras, que dependiendo del tamaño; pueden repararse o no. Por esto es importante cuidar al biodigestor de animales, objetos y hasta de prácticas rutinarias como el desmalezado y la guadaña, que incluso con precaución pueden causar daños. De igual forma, es importante el cuidar los reservorios y las mangueras por donde circula y se almacena el biogás, para garantizar su óptimo funcionamiento y su duración. (Pedraza, Chará, Conde, & Giraldo, 2002; RedBioLac, s.f.).

Como ya se vio, en cuanto a la duración, los biodigestores de geomembrana pueden llegar a durar más de 15 años, incluso cuando están expuestos al sol, mientras que los de polietileno tubular pueden durar entre 5 a 6 años cuando han sido bien cuidados. Después de ese tiempo, es necesario cambiar el plástico por uno nuevo. Sin los cuidados y protecciones adecuados, un biodigestor puede llegar a romperse a los pocos días de su instalación. En general, la clave de una prolongada duración siempre será una protección adecuada y un buen programa de mantenimiento (RedBioLac, s.f.).

Con el objetivo de garantizar un funcionamiento adecuado del biodigestor, deben realizarse una serie de actividades con periodicidad diaria, semanal y/o mensual tal como se propone en la tabla 20.

Tabla 20. Actividades para el correcto funcionamiento del biodigestor

Actividades	D	S	M
Carga diaria del sistema con la mezcla adecuada (estiércol-agua)	X		
Limpieza e inspección de cajas y canales de entrada al biodigestor y de la malla (en caso que la haya)		X	
Inspección del sistema de conducción de gas	X		
Inspección de integridad del plástico del biodigestor			X
Revisar nivel de agua en la válvula de seguridad		X	
Revisar posibles acumulaciones de agua en las partes bajas del sistema de conducción de gas		X	
Revisar que no haya fugas en la bolsa de reservorio de gas		X	
Revisar estado de techo y malla y reparar cualquier daño			X
Desmalezar manualmente			X
Revisar que no se forme una capa flotante dentro del biodigestor, y en caso que la haya deshacerla con un masaje suave			X
Podar el pasto, retirar hojas, ramas y objetos extraños que se acumulen en el techo o alrededores del biodigestor		X	

D = Diarias; S = Semanales; M = Mensuales.

Fuente: Tomado y adaptado de (Chará Orozco, 2002)

Cuidados adicionales

Aislantes de zanja

Los aislantes de zanja se utilizan especialmente en climas fríos para ayudar al biodigestor a mantener la temperatura interior, evitando cambios bruscos que puedan interferir con el proceso de digestión. Pueden conferir mayor resistencia a los taludes de la fosa, y evitar el derrumbamiento de la misma, al tiempo que protegen el plástico del biodigestor, evitando rasgaduras y pinchazos y aumentando su tiempo de vida. Los aislantes de zanja se pueden instalar en las paredes y suelos, y pueden verse en múltiples materiales, como paja, bambú u otros materiales orgánicos, o ser del mismo geotextil con el que se hace el biodigestor (Martí Herrero, J, 2019).

Techos, cubiertas e invernaderos

Cuando se trabaja en clima cálido, es importante instalar sobre el biodigestor un techo o cubierta, que puede ser de zinc u otro material liviano, con el fin de evitar que el sol de directamente sobre el plástico del sistema, evitando su cristalización, y también para protegerlo de ramas u objetos que puedan lastimarlo o romperlo (Chará Orozco, 2002),

Por el contrario, cuando se trabaja en climas fríos, es más recomendable la instalación de un sistema de invernadero alrededor del biodigestor, que ayude a aumentar la temperatura promedio del sistema, y evite caídas bruscas en la temperatura que puedan afectar el proceso de degradación. El invernadero debe tener un diseño compacto, para minimizar la pérdida de calor, y debe ser construido con materiales que no se deterioren rápidamente con la radiación del sol.

Cercas, elementos extraños y control de malezas alrededor del biodigestor

El uso de una malla (como la malla pajarera) puede evitar que animales y personas no autorizadas tengan acceso al biodigestor, y que puedan dañarlo o caer sobre él. Es ideal que entre la malla y el biodigestor quede un área o corredor en el que una persona pueda caminar cómodamente y hacer las tareas de mantenimiento, arreglos, limpieza e inspección. El espacio alrededor del biodigestor, sólo debe ser usado para circular, y para hacer las tareas mencionadas, y bajo ninguna circunstancia se debe permitir el almacenamiento de materiales o herramientas en esta zona, velando siempre por que permanezca libre, limpia, y sin malezas u objetos que puedan dañar el plástico. En este sentido, un trabajo periódico de limpieza de malezas puede complementar el esfuerzo de instalación de la cerca. El trabajo de limpieza de maleza siempre debe ser manual y nunca con guadañas u otros elementos que puedan lastimar el plástico (Chará Orozco, 2002).

Mezcla y calidad de la carga

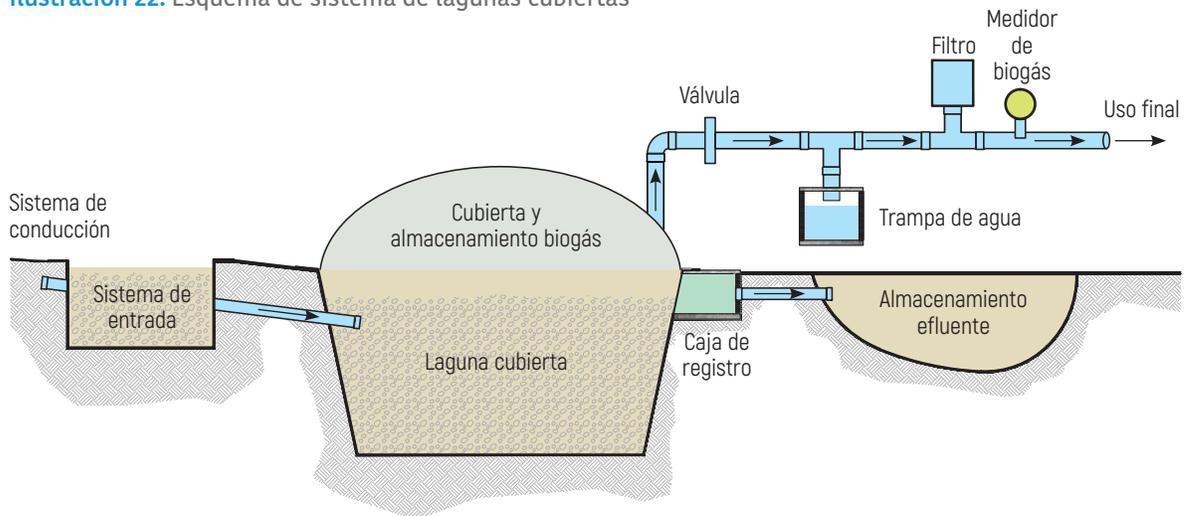
El material de carga (mezcla de estiércol y agua), debe ser preparado a diario, y antes de las actividades de limpieza de las instalaciones. La mezcla debe ser cuidadosamente preparada, y no debe contener materiales extraños tales como residuos fibrosos, bagazos, virutas u otros materiales que puedan afectar el proceso de digestión anaerobia, atentar contra la integridad del plástico, u obstruir las entradas y/o salidas del sistema. También se

debe tener mucho cuidado de no permitir que detergentes, antibióticos o desinfectantes entren en la mezcla de carga (Chará Orozco, 2002). En esta parte es importante recordar lo visto en la sección 2.2, sobre la importancia de hacer bien la mezcla de materia orgánica y agua, para obtener la concentración deseada de sólidos totales, que idealmente es del 5%, pero que podría estar entre el 3% y el 16% (FAO, 2011).

4.2 SISTEMAS DE LAGUNAS CUBIERTAS

El sistema de digestión de laguna cubierta (Ilustración 22) aprovecha el requisito de bajo mantenimiento de una laguna, mientras captura biogás bajo una cubierta flexible e impermeable (Doug Hamilton, 2019). Los biodigestores tipo laguna cubierta tienen Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) superiores a 40 días, y generalmente operan con sustrato en fase líquida con escasa materia orgánica sólida. Cuando la temperatura ambiente es de entre 10°C y 25°C (condiciones psicrófilas), los TRH pueden ser superiores a los 50 o 60 días y, aunque no existen límites en estos tiempos de retención, no se recomienda TRH superiores a 100 días ya que la producción de biogás cae considerablemente (Burgos, 2017).

Ilustración 22. Esquema de sistema de lagunas cubiertas



Fuente: (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

Como este tipo de digestores no se calientan, la temperatura de las lagunas cubiertas sigue los patrones climáticos de la zona donde se instala, y la producción de metano disminuye cuando la temperatura de la laguna desciende por debajo de los 20 grados centígrados. De esta manera, una laguna cubierta ubicada en un clima cálido producirá gas durante todo el año, mientras que, en climas fríos, se observará que la producción de gas disminuirá considerablemente si se le compara con sistemas instalados en pisos térmicos templados o cálidos (Doug Hamilton, 2019). Los biodigestores tipo laguna cubierta no contemplan sistema de agitación ni de calefacción, y sirven para el tratamiento de aguas residuales con bajas concentraciones de materia sólida, en sitios con bajas temperaturas, esto los hace sistemas de digestión de bajo costo y mantenimiento (Burgos, 2017).

Como los lodos se almacenan en lagunas hasta por 20 años, los microorganismos formadores de metano también permanecen en la laguna cubierta durante mucho tiempo, lo que significa que gran parte de los nutrientes de los fertilizantes, especialmente el fósforo, también permanecerán atrapados en la laguna cubierta durante largas temporadas (Doug Hamilton, 2019).

Etapas en los sistemas de digestión de laguna cubierta

Los sistemas de digestión de laguna cubierta, son sistemas de 4 etapas: separación, digestión, almacenamiento y aprovechamiento. Cada una de estas etapas, se describen con mucho más detalle a continuación:

Separación

Esta etapa se realiza en un estanque decantador, en donde ocurre un proceso de decantación por un determinado periodo, cuando el proceso termina; las fases quedan separadas y es posible eliminar los elementos no deseados para la digestión. Al final del proceso se obtienen 3 fases, dos sólidas (parte superior e inferior) y una líquida (intermedia) (Ilustración 17) (Burgos, 2017).

Digestión

En esta etapa las bacterias psicrófilas, que actúan a temperaturas de operación entre 10°C a 25°C, y en condiciones de anaerobiosis; generan metano al interior del biodigestor. Los Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) son extensos, y como lo mencionamos anteriormente pueden llegar a superar los 50 días (Burgos, 2017).

Almacenamiento

Para cada uno de los productos resultantes hay un lugar de almacenamiento. Para el sustrato (subproducto), el almacenamiento es un estanque de acopio contiguo al biodigestor; con un volumen dado por un TRH de entre 30 a 60 días. Dicho sustrato, debe ser vaciado y regado en praderas una vez alcanzada la capacidad máxima del contenedor para dar paso a una nueva producción. Por su parte el biogás (producto) se acumula en el mismo biodigestor en el espacio que queda en la cubierta flexible. La capacidad de almacenamiento de dicha cubierta es limitada a la producción de 2 a 3 días (Burgos, 2017).

Aprovechamiento

El sustrato es utilizado como bio-fertilizante y acondicionador de suelos, y el biogás se aprovecha en la generación térmica, en la generación eléctrica o en ambas (co-generación), esto dependiendo del potencial de generación de biogás para cada predio en particular (Burgos, 2017).

5 Acondicionamiento del biogás

El acondicionamiento del biogás es un proceso que bien se podría subdividir en tres fases a saber: en primer lugar, la fase de secado, que se refiere específicamente a la eliminación del vapor de agua (H_2O) presente en el biogás. Después del secado, el proceso de limpieza se refiere a la remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en la mezcla de gases producto de la digestión anaerobia. Finalmente, la purificación se refiere a la remoción del dióxido de carbono (CO_2) presente en esta misma mezcla, con el objetivo de aumentar la concentración de metano (CH_4), idealmente al 95%, que es lo equivalente al gas natural.



¿Por qué acondicionar el biogás? El biogás, como ya se mencionó en la sección uno de la guía, es una mezcla de varios gases que se produce dentro del biodigestor, y cuyo valor energético radica específicamente en las moléculas de metano (CH_4), que son las que generan energía durante su proceso de combustión. Entre mayor sea la concentración de metano (CH_4) en el biogás, mayor valor energético tendrá, y por tanto su capacidad de reemplazar a otros combustibles como el gas natural será mayor.

El biogás debe ser acondicionado por varias razones. En primer lugar, por seguridad, ya que eliminar el sulfuro de hidrógeno de la mezcla garantiza una operación segura, al evitar riesgos de intoxicación en personas y corrosión de equipos. La segunda, para poder aumentar su poder calorífico de manera que pueda reemplazar otras fuentes de combustión, y la tercera, que se relaciona con las dos anteriores, es para poder utilizarlo en muchos más aparatos, equipos y sistemas, como por ejemplo, en calderas, motores, vehículos y generadores. La Tabla 21 muestra los tratamientos necesarios según el uso que se le quiera dar al biogás.

Tabla 21. Tratamiento según el uso final del biogás

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación del CO_2	Eliminación del H_2S
Producción térmica en calderas	1	0	0 - 1 - 2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 - 2	0 - 1 - 2	1 o 2
Combustible para vehículos o turbinas	2	2	2
Sustitución del gas natural	2	2	2
Celdas de combustible	2	2	2

0 = no tratamiento, 1 = tratamiento parcial, 2 = tratamiento elevado

Fuente: (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

5.1 SECADO DEL BIOGÁS: PROCESOS DE REMOCIÓN DEL VAPOR DE AGUA

El biogás, cuando sale del reactor, está saturado de vapor de agua, y tiene una humedad relativa cercana a la que encontramos dentro del biodigestor cuando está en operación. El

secado del biogás, precisamente se refiere al proceso mediante el cual se reduce la humedad relativa del biogás a niveles por debajo del 60%, con el fin de evitar la condensación del vapor de agua, y por tanto, problemas como el taponamiento de las tuberías, o la corrosión de equipos y tuberías por la acción del ácido sulfúrico, que es un compuesto que se forma por la reacción entre el vapor de agua condensado y el ácido sulfhídrico (H₂S), que también está presente en el biogás (FAO, 2011). La tabla 22 describe dos de las tecnologías más utilizadas para el secado del biogás ((FNR), 2010).

Tabla 22. Tecnologías para el secado del biogás

Método	Comentarios
Secado por condensación	La técnica de secado por condensación se basa en pasar del estado gaseoso al estado líquido, el agua presente en el biogás por medio de la disminución de la temperatura de la tubería de conducción (por debajo de punto de rocío o punto de condensación). Para lograr esta disminución en la temperatura, podemos hacer cosas tan sencillas como enterrar la tubería bajo tierra, hasta cosas tan complejas como irrigar la tubería de conducción de gas con agua fría, para lograr que la temperatura baje, pero sin que llegue al punto de congelación. Independientemente del montaje que se elija, es importante tener una trampa, o mecanismo que permita el drenado fácil y periódico de la tubería ((FNR), 2010).
Secado por absorción	La técnica de absorción se basa en el uso de materiales absorbentes como el gel de sílice, los óxidos de aluminio o incluso el glicol, para atrapar la humedad presente en el gas sobre la superficie de estos materiales cuando son sólidos (gel de sílice y óxidos de aluminio), o en el flujo del mismo (glicol) cuando es líquido, y pasa contra-corriente a una presión y temperatura definida ((FNR), 2010).

Fuente: Elaboración propia

5.2 PROCESO DE LIMPIEZA DEL BIOGÁS: LA REMOCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO H₂S

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) debe eliminarse del biogás por lo menos por dos razones:

1. Para evitar que equipos y tuberías alimentadas con biogás puedan corroerse y dañarse por acción del ácido sulfúrico que se forma cuando el sulfuro de hidrógeno (H₂S) entra en contacto con el agua.
2. Para evitar accidentes de envenenamiento o muerte en personas expuestas al sulfuro de hidrógeno (H₂S), aun cuando las concentraciones sean muy bajas.

Con respecto del primer punto, en la tabla 23 se observan las concentraciones máximas admitidas de H₂S en el biogás, dependiendo el uso que se le quiera dar.

Con respecto del segundo punto, los síntomas generales que puede presentar una persona expuesta a sulfuro de hidrógeno (H₂S) son: irritación de ojos y membranas mucosas, náuseas, vómito, decoloración de la piel, delirios y calambres. La sangre se vuelve de color marrón a verde, y funcionalmente se obstaculiza el transporte de oxígeno generando dificultad para respirar, ahogamiento, paro cardíaco y finalmente la muerte. A concentraciones menores de 0,05% (vol.) los efectos letales del sulfuro de hidrógeno (H₂S) ocurren dentro de la hora siguiente a la exposición, y en concentraciones más altas la muerte ocurre de manera inmediata (Marchaim, 1992)

Tabla 23. Requerimiento de pureza para usos de biogás

Tecnología	Requerimientos
Calderas	H ₂ S < 1000ppm. Se debe remover el condensado
Estufa de cocina	H ₂ S < 10ppm. Se debe remover el condensado
Motores de combustión interna	H ₂ S < 100ppm. Se debe remover el condensado y los siloxanos.
Motores de combustión externa (Motores Stirling)	H ₂ S < 1000ppm. Se debe remover el condensado
Celda de combustión	H ₂ S en un rango entre < 1ppm y < 20 ppm dependiendo el tipo de celda
Reemplazo de gas natural (para inyección en tubería)	H ₂ S < 4ppm. CH ₄ > 95%, CO ₂ < 2% volumen. H ₂ O < 1 × 10 ⁻⁴ . No puede tener siloxanos ni particulados

Fuente: (Gordillo Sierra et al., 2019)

Todos los procesos de biodigestión generan sulfuro de hidrógeno (H₂S) en cantidades diferentes, y dependiendo del sustrato que se utilice para la alimentación del biodigestor. Se estima, de manera general, que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás oscilan entre 500 y 10.000 ppm. A través de un estudio realizado por la Universidad de los Andes en convenio con la Asociación Porkcolombia-FNP (Gordillo Sierra et al., 2019), se determinó que en biodigestores alimentados con estiércol de cerdo y porcínaza, las concentraciones de H₂S están entre 2500 y 4500 ppm, lo que es altamente tóxico y letal, incluso con tiempo de exposición de segundos.

Como lo mencionamos al inicio de esta sección, el proceso de limpieza consiste, precisamente, en retirar el sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás, a fin de hacerlo seguro para consumir y manipular. Entre las tecnologías más conocidas de desulfuración están las que se observan en la tabla 24.

Tabla 24. Métodos de remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S) (desulfuración)

Tecnología	Descripción	Ventajas	Desventajas	Problemas no resueltos
Oxidación biológica dentro del biodigestor*	Aire es inyectado al espacio de almacenamiento de gas dentro del biodigestor. Las bacterias oxidantes de azufre consumen el oxígeno del aire para convertir H ₂ S a azufre elemental y agua	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • No requiere químicos • Bajos costos de operación y mantenimiento • Puede reducir sustancialmente las concentraciones de H₂S 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto potencial para producir una mezcla explosiva • Desempeño inconsistente • Solo se alcanza una remoción parcial de H₂S • El N₂ y O₂ del aire diluyen el CH₄ del biogás 	<ul style="list-style-type: none"> • Para biodigestores grandes, la inyección uniforme de aire en el espacio • Peligros de operación • La acumulación de azufre en biodigestores no mezclados
Administración de químicos durante la biodigestión*	Cloruros de hierro, fosfatos de hierro y óxidos de hierro se agregan directamente al biodigestor para unirse al H ₂ S y formar sulfuros de hierro insolubles	<ul style="list-style-type: none"> • Efectivo para un tratamiento inicial de muy altas concentraciones de H₂S 	<ul style="list-style-type: none"> • No alcanza concentraciones realmente bajas y estables • Debe ser usado en conjunto con otra tecnología para alcanzar niveles de H₂S por debajo de 100ppm • Costo de los químicos y riesgos de seguridad de estos 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad necesaria para ser administrada en biodigestores grandes sin mezclado
Oxidación biológica en un filtro de bio-goteo	Una cantidad pequeña de O ₂ se inyecta a la corriente de biogás que pasa a través de una torre empacada, en la cual microorganismos oxidan H ₂ S a azufre elemental. Líquido es continuamente proporcionada sobre el empaque para proveer humedad y nutrientes necesarios para mantener a los microorganismos	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración de un único reactor • Altas remociones de H₂S a partir de concentraciones altas • No se requiere la manipulación ni compra de químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de solución de nutrientes • Requiere intervalos de no uso para limpieza y regeneración del medio • Control y mantenimiento constante para asegurar calidad • Si el medio es inorgánico, requiere de un paso previo de inmovilización bacteriana 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad del sistema para diseño en granja • Complejidad en el mantenimiento del sistema para diseño en granja
Oxidación biológica en un biofiltro con materia orgánica de empaque sin solución líquida	El biogás se pasa a través de un medio de empaque orgánico con bacterias nativas al medio, que oxidan el H ₂ S a S elemental.	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración simple que no requiere de inyección adicional de líquidos o gases • Buena eficiencia de remoción • Materia del empaque altamente disponible en granjas porcícolas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología poco investigada y relativamente nueva, por lo cual los parámetros de flujo, diseño y demás aún son muy desconocidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento del efluente y empaque al acabar su vida útil • Desempeño del filtro concentraciones muy altas de H₂S
Quimisorción usando óxido de hierro o hidróxido de hierro	El biogás se pasa a través de un medio de empaque impregnado con óxido de hierro o hidróxido de hierro. El H ₂ S reacción con el hierro para formar compuestos sólidos de azufre.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología ampliamente usada e investigada • Puede manejar altas concentraciones de H₂S • Parte del medio puede ser regenerado de manera limitada. • Generalmente es el medio de limpieza usado en granjas porcícolas en otras partes del mundo 	<ul style="list-style-type: none"> • Incomodidad de regeneración • Frecuencia de cambio y costo de los componentes activos • El empaque usado generalmente se considera peligroso para desecho 	<ul style="list-style-type: none"> • Viabilidad de usar diferentes medios (materia celulósica de desecho o biodegradable) como material de empaque • Manejo de emisiones de calor y SO₂ durante la regeneración y cambio del medio de empaque
Absorción en carbón activado	El biogás se pasa a través de un filtro empacado con carbón activado, comúnmente impregnado con KI o H ₂ SO ₄ . El H ₂ S se convierte a azufre elemental. Puede ser usado posterior a un filtrado biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Alcanza una remoción de H₂S casi total (no deja casi trazas) • Es una tecnología madura • Tiene una configuración del vaso simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de cambio y costo de los componentes activos. Manejo de químicos • La regeneración en granja es compleja y costosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Su efecto o uso después de filtrado biológico
Scrubbing con agua u otros solventes	El biogás es pasado a través de una torre de scrubbing contra corriente en la cual el H ₂ S es físicamente absorbido por el agua	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de tanto H₂S como CO₂ a partir de altas concentraciones de manera eficiente y confiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de agua • Altos consumo de energía • Sistema complejo que requiere inversiones iniciales altas • Manejo y costo de químicos aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo del agua desecho • Factores operacionales a pequeña escala

Fuente: (Gordillo Sierra et al., 2019)

En la actualidad, La Asociación Porkcolombia - FNP y la Universidad de los Andes, están desarrollando una investigación sobre métodos de desulfuración que resulten fáciles de implementar, eficientes y costo efectivo para los porcicultores, de manera que, estos puedan obtener un biogás más seguro, de mejor calidad y con mayores posibles usos dentro de las granjas. A la fecha, se han evaluado tres tecnologías a escala de laboratorio, dentro de las mencionadas en la tabla 23, encontrando que, la impregnación con un agente activo, hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) o hidróxido de sodio $\text{Na}(\text{OH})$, mejora la efectividad en la remoción del H_2S con porcentajes de eliminación de entre el 74% y 99% para una corriente de gas con concentración de 800 partes por millón (ppm). La segunda etapa dentro de esta investigación está próxima a ejecutarse, y consiste en el diseño de un prototipo de filtro que será probado en una granja porcícola para obtener datos sobre la respuesta de dichos filtros a condiciones reales, de manera que sea posible plantear un diseño de filtro final, que pueda ser implementado por cualquier poricultor. Los resultados de dicha investigación serán ampliados en una publicación posterior.

5.3 PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS: LA REMOCIÓN DEL CO_2

El objetivo principal de la fase de purificación, es aumentar la concentración de metano (CH_4) en el biogás, mejorando su poder calorífico, y con ellos su rango de utilización. La elección del método de purificación del biogás a utilizar dependerá de factores tan básicos como la cantidad de biogás que se quiere purificar, la facilidad de adquisición de los equipos y materiales que se requieren, y el presupuesto destinado para ello, hasta factores más técnicos como la concentración mínima a la que queremos llevar el metano, o de remoción de dióxido de carbono¹⁰, las pérdidas de metano que estamos dispuestos a tolerar, el nivel de desgaste de las matrices que usaremos, o la formación de nuevos compuestos derivados de las reacciones químicas de purificación, y que puedan ser ambientalmente indeseados. En la tabla 25 se pueden ver las tecnologías existentes para la remoción de CO_2 .

Un proceso opcional, y posterior a la adecuación del biogás, es pasar el biogás ya purificado por un compresor, de manera que se eleve la presión a los niveles requeridos para inyectarlo en distintos equipos o tuberías, y dependiendo de la escala, incluso hasta en gasoductos ((FNR), 2010).

¹⁰ El uso del biogás en sistemas de combustión interna, generadores y calentadores, no requiere de la remoción del CO_2 , pero hay otros usos que precisan de mayor densidad del combustible, como los vehículos, que si precisan de procesos de purificación (FAO, 2011).

Tabla 25. Tecnologías para la remoción de dióxido de carbono (CO₂)

Método	Comentarios
Absorción: Limpieza con agua	Esta técnica parte del principio de que el CO ₂ se disuelve en agua con mayor facilidad que el CH ₄ . Lo que se hace es un lavado del biogás, que pasa a través de una solución acuosa a presión y contracorriente. La remoción de CO ₂ puede llegar a valores por debajo del 0,5% (FAO, 2011; GIZ, MINENERGÍA, 2012)
Absorción: Limpieza Química (amina)	Es una técnica de absorción química en la que el CO ₂ es transferido a un líquido de limpieza cuando el biogás entra en contacto con el mismo. Esta técnica no requiere la presurización del biogás. La limpieza del líquido de limpieza demanda una cantidad importante de energía térmica, y este es el problema de este método ((FNR), 2010).
Absorción con tecnología de oscilación de presión (PSA)	Es una técnica que permite la separación física de los gases por medio de tamices de carbono molecular, y se basa en la afinidad que ciertos gases, como el CO ₂ , tienen por ciertas superficies sólidas, como el carbón activado. A temperatura ambiente y altas presiones, este método permite obtener metano (CH ₄) en concentraciones cercanas al 95% ((FNR), 2010; FAO, 2011).
Tecnología de diafragma	Básicamente es una técnica de separación de gases que utiliza membranas, que pueden ser secas o húmedas, para separar el CO ₂ del resto del gas (FAO, 2011; GIZ, MINENERGÍA, 2012).
Mineralización y bio-mineralización	En esta técnica, el CO ₂ es removido del biogás a través de reacciones químicas con otros compuestos, por ejemplo, con cal viva (CaO), para formar carbonato de calcio (CaCO ₃) (FAO, 2011).
Purificación criogénica del biogás	Esta técnica se basa en las diferencias en los puntos de ebullición entre los componentes del biogás para su separación (-80°C para el CH ₄ y +15°C para el CO ₂). Cuando los componentes del biogás han sido enfriados hasta su licuefacción, se separan a través de un proceso de destilación (FAO, 2011).

Fuente: Elaboración propia

6 Seguridad en la producción de biogás

El biogás está llamado a tener un rol fundamental dentro de la matriz energética global, al punto que las políticas y estrategias que se están implementando en muchos países alrededor del mundo le apuntan, cada vez con mayor fuerza, a incrementar la demanda mundial de bioenergía, en remplazo de las fuentes de energía convencionales. El promover la instalación de pequeñas, medianas y grandes plantas de biogás hace parte de dichas agendas, y por tanto, la operación segura de estas plantas también está empezando a ser una prioridad (V. Casson Moreno et al., 2016).

Pese a que la instalación de plantas de biogás ha aumentado significativamente en el mundo, las cuestiones relacionadas con el control de riesgos y la segura operación de las mismas no se han tomado con el mismo nivel de importancia y rigor, lo que se refleja en la insuficiente normatividad, y en las pocas herramientas y protocolos para la segura operación y control de peligros.

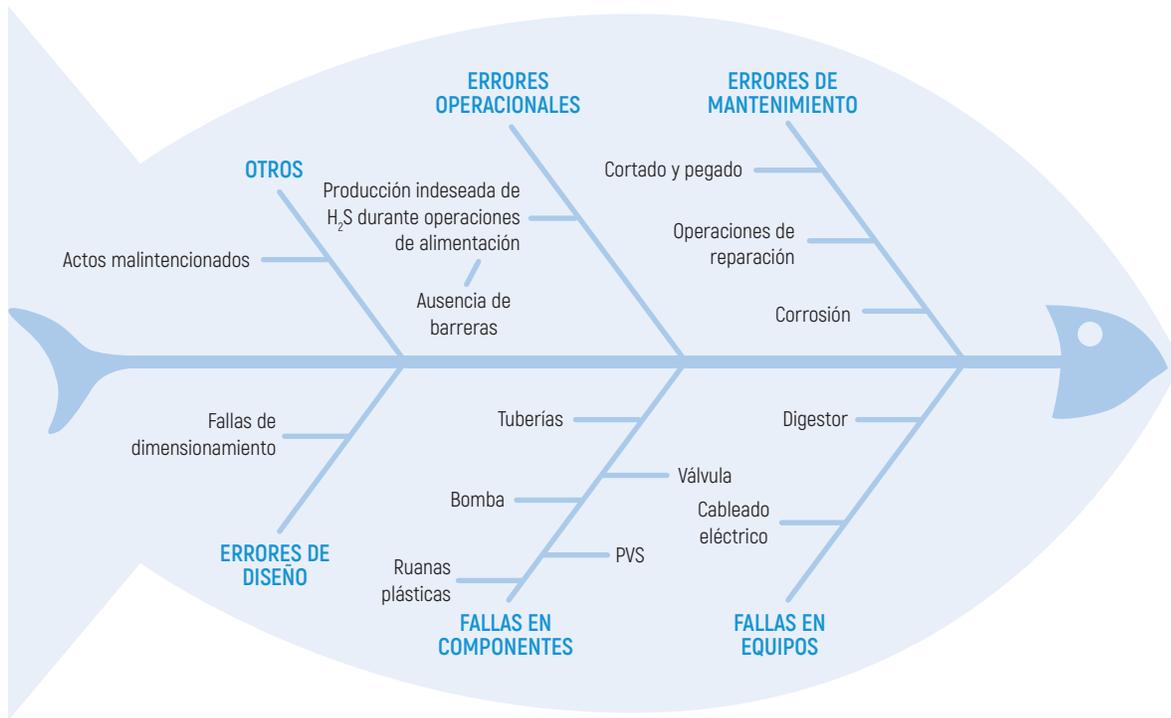
Otro problema no menos importante en materia de seguridad operativa, es la falta de documentación y registro de incidentes y accidentes, lo que es importante, no sólo para la segura operación de cada planta en particular, sino para la construcción de marcos normativos, protocolarios y procedimentales enfocados a evitar nuevos eventos, y en aprender de los errores del pasado para disminuir los riesgos de operarios y usuarios de plantas de digestión. Desafortunadamente, la realidad es que el registro de accidentes e incidentes es muy bajo, y la documentación de estos es escasa y deficiente, lo que no permite el desarrollo de un marco normativo adecuado, ni el establecimiento de estándares nacionales e internacionales específicos y armonizados para la producción y operación segura de plantas de biogás (V. Casson Moreno et al., 2016).

Estudios realizados hasta la fecha con la información y documentación disponible, han establecido que la mayoría de los accidentes registrados se relacionan con incendios, explosiones, y liberación de biogás crudo (que todavía contiene sulfuro de hidrógeno). A partir de dicha información, se han establecido algunas de las causas directas asociadas con los accidentes más recurrentes, tal y como se puede ver en el siguiente diagrama de espina de pescado (Ilustración 23).

Como puede verse en el diagrama de espina de pescado, las causas más frecuentes de accidentes en plantas de digestión son:

- **Fallas de equipos:** son las fallas entendidas como un conjunto de componentes. Por ejemplo, del biodigestor como tal, o de bombas y cableado cuando los hay.
- **Fallas de componentes:** Se refiere por ejemplo al fallo de válvulas, bombas, ruanas plásticas, tuberías, etc.
- **Errores de mantenimiento:** son errores que ocurren en el proceso de reparación, pegado, soldado, corte o por corrosión. También puede ser la falta de mantenimiento en sí misma.

Ilustración 23. Diagrama de espina de pescado de las causas de accidentes en plantas de biogás.



Fuente: Tomado y adaptado de (V. Casson Moreno et al., 2016)

- **Errores operativos:** pueden ser errores en el proceso de carga y operación del biodigestor, que afectan otras variables como los tiempos de retención, la temperatura, las condiciones de anaerobiosis o la calidad del material orgánico que entra al sistema, entre otras.
- **Errores de diseño:** Son aquellos errores causados por el mal diseño y dimensionamiento del biodigestor. Un mal diseño puede hacer que el biodigestor no funcione y se pierda la inversión.
- **Otros daños:** Pueden ser daños causados por agentes externos, con o sin intención.

Como la mayoría de las plantas de producción de biogás construidas en el mundo son de pequeña o mediana escala, otro problema asociado a la segura operación, es que muchas están por debajo de los umbrales para la aplicación de la legislación existente para el control de riesgos de accidentes graves, lo que es preocupante, en la medida en que estudios como los realizados por Casson Moreno (2016), han demostrado, a través de evaluaciones matriciales, que el perfil de riesgo estimado de la producción de biogás no es despreciable, y que muchos de los accidentes que se han documentado y registrado, han terminado en lesiones y muertes.

En este orden de ideas, el objetivo de este apartado no es el de alejar al usuario de la implementación de sistemas de digestión por miedo a sus riesgos, sino por el contrario, es alentarlos a implementar el sistema bajo protocolos de operación segura, y gestionando

adecuadamente los riesgos asociados a cada fase y actividad, de manera tal que se garantice tanto un correcto funcionamiento como una segura operación.

RIESGOS Y PELIGROS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN DE BIODIGESTORES DE PEQUEÑA O MEDIANA ESCALA

La Agencia alemana de salud y seguridad ocupacional agrícola, ofrece una visión panorámica de los potenciales riesgos y peligros de operación. La tabla 26 resume dichos riesgos y peligros como lo veremos a continuación.

Tabla 26. Peligros y riesgos potenciales durante la operación de un biodigestor

Riesgos y Peligros	Descripción
Peligro de incendio y explosión	Cuando el biogás entra en contacto con el oxígeno del aire, se forma una atmósfera explosiva, que no es otra cosa que una atmósfera donde hay probabilidad de explosión. Para que una atmósfera sea explosiva, la concentración de biogás presente en dicha atmósfera debe ser significativa, y en el caso del biogás, mientras no se sobrepasen los rangos que se muestran en la tabla 27, no habrá peligro de explosión. De cualquier forma, el riesgo de incendio si permanece, y debe preverse, ya que puede darse por la presencia de chispas, rayos u otras fuentes cercanas de ignición. Como se puede suponer, la zona más explosiva en la operación de un sistema de digestión anaerobia, es precisamente dentro del biodigestor. Por cuanto una vez más, es importante asegurar que nunca entre aire a la cámara de fermentación. A medida que aumenta la distancia con respecto del biodigestor, el riesgo de explosión disminuye, concentrándose especialmente en las válvulas de alivio, las tuberías, las conexiones a estufas y motores, y en los quemadores de gas que se construyan para el manejo de la presión ([FNR], 2010).
Peligro de envenenamiento y asfixia	De acuerdo a la sección 5.2, el peligro de envenenamiento y asfixia está relacionado con la presencia de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) en el biogás. En la tabla 28 se pueden observar los efectos de varias concentraciones de H ₂ S sobre la salud, y cómo con concentraciones mayores a 15 ppm, los efectos de envenenamiento y asfixia van creciendo hasta generar la muerte. Según pruebas de campo realizadas por la Universidad de los Andes en convenio con la Asociación Porkcolombia-, en biodigestores de pequeña y/o mediana escala instalados en granjas porcícolas, y que son alimentados con porcínaza, pueden llegar a reportar concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) de hasta 5000 partes por millón (ppm), lo que significa que estos sistemas necesitan de la implementación de medidas estrictas y eficientes, que garanticen la limpieza del gas para una operación segura y libre de riesgos.
Riesgo de Presencia de microorganismos Patógenos en el biofertilizante	El proceso de digestión anaerobia, cuando se hace de manera adecuada, asegura la eliminación de patógenos, porque las condiciones de falta de oxígeno, alta temperatura y de pH que se dan dentro del biodigestor, no les permiten sobrevivir. Sin embargo, cuando el sistema no se diseña, u opera correctamente, el riesgo de que los patógenos sobrevivan aumenta, y el biofertilizante que sale del biodigestor podría potencialmente contener un gran número de dichos patógenos. La presencia de estos patógenos afectaría la salubridad de los cultivos y la salud de las personas, lo que es un riesgo con un potencial de daño alto, por lo que requiere de una adecuada gestión. Por ejemplo, pueden implementarse medidas que permitan la verificación de la presencia de patógenos a la salida del reactor, o sistemas para asegurar que las condiciones de la cámara de fermentación son las adecuadas para la eliminación de los patógenos.
Peligro de emisiones en suelos o aguas	Los biodigestores se usan, entre otras razones, para dar adecuado manejo al estiércol y la porcínaza que se genera en las granjas, de manera que se evite tanto la contaminación de los suelos y las aguas, como los demás efectos negativos sobre el medio ambiente, los animales y las personas que viven y rodean la granja. Cuando por motivos constructivos, operacionales, o por accidentes se generan derrames o fugas, se empiezan a generar malos olores, eutrofización de los suelos y las aguas cercanas a la zona donde se está dando la descarga, y la aparición de focos de infección y de vectores asociados a la transmisión de enfermedades. Para evitar este tipo de riesgos, es necesaria una adecuada prevención, y el establecimiento de protocolos de inspección, mantenimiento, e incluso de rápido manejo, para los casos de derrames o fugas que impliquen el vertimiento del material de carga (porcínaza)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Propiedades de los gases

	Biogás	Gas Natural	Propano	Metano	Hidrógeno
Valor calorífico (kWh/m ³)	6	10	26	10	3
Densidad (kg/m ³)	1,2	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidad Relativa respecto al aire (kg/m ³)	0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Temperatura de ignición (°C)	700	650	470	600	585
Rango explosivo (vol.%)	6-22	4,4-15	1,7-10,9	4,4-16,5	4-77

Fuente: ((FNR), 2010)

Tabla 28. Efecto tóxico del sulfuro de hidrógeno – H₂S

Concentración (en el aire)	Efecto
0,03-0,15 ppm	Umbral de percepción (olor de huevos podridos)
15-75 ppm	Irritación de los ojos y el tracto respiratorio, náuseas, vómitos, dolor de cabeza, pérdida de la conciencia.
150-300 ppm (0,015-0,03%)	Parálisis de los nervios olfativos
>375 ppm (0,038%)	Muerte por envenenamiento (luego de varias horas)
>750 ppm (0,075%)	Pérdida de la conciencia y muerte por paro respiratorio en 30-60 minutos.
Mayor a 1000 ppm (0,1%)	Muerte rápida por parálisis respiratoria en unos cuantos minutos.

Fuente: ((FNR), 2010)

NORMATIVA PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS EN ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS

Europa, es el continente que más ha trabajado en materia de evaluación y prevención de riesgos asociados a la operación de sistemas de digestión anaerobia, y dentro del continente europeo, Alemania es el país que más ha aportado a la generación de estándares para la segura operación de plantas de biogás. En América Latina, México y Chile son dos países que pueden usarse como referentes en materia de segura operación, mientras que en Colombia se construyen marcos y lineamientos propios, y más adaptados al contexto particular de la nación. A continuación, se presentarán algunos de los mencionados marcos normativos, junto con algunas medidas generales de prevención para el manejo de riesgos y peligros en plantas de biogás de pequeña y mediana escala.

Europa: existen tres normativas que regulan la Prevención de Riesgos en atmósferas explosivas:

- Real Decreto 400/1996 relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (Trasposición de la Directiva 94/9/CE (ATEX-100).
- Real Decreto 681/2003 sobre protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de la presencia de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo (Trasposición de la Directiva 99/92/CE (ATEX-137).

- La Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades para una adecuada protección de la salud de los trabajadores en el lugar de trabajo (ATEX, 2018).

Alemania: Existen las reglas de seguridad para sistemas de biogás, publicadas por la Agencia Alemana de Salud y Seguridad Ocupacional Agrícola, y que proporcionan aspectos claves de seguridad relevantes para la operación de plantas de biogás ((FNR), 2010).

México: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) emitieron en 2010 el documento “*Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México*” que busca asegurar la calidad, durabilidad, rendimiento y la seguridad en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de digestión anaerobia tipo laguna cubierta, para tratar los desechos orgánicos y efluentes, provenientes de las granjas porcinas y establos lecheros del país, garantizando también el manejo, y aprovechamiento del biogás producido durante este proceso (SEMARNAT, SAGARPA, 2010).

Chile: desde 2017, se aprobó el reglamento de seguridad de plantas de biogás, cuyo objeto principal es establecer los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones de biogás en las etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección, y durante las actividades de recepción, preparación y almacenamiento de sustrato, y en la producción, almacenamiento, transferencia, tratamiento, suministro, uso y consumo de biogás. También se establecen en dicho reglamento las obligaciones de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas actividades para garantizar una operación segura (Ministerio de Minas, 2017).

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA EL MANEJO DE RIESGOS Y PELIGROS

En la tabla 29 se mencionan una serie de medidas de prevención para cada uno de los riesgos y peligros que se asocian a la operación del sistema de digestión anaerobia (Ilustración 24).

Tabla 29. Medidas de prevención

Riesgos & Peligros	Medidas de prevención
Peligro de incendio y explosión	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar los equipos permitidos para el trabajo en atmósferas explosivas (ATEX¹¹). (Ilustración 25) • Capacitar a los trabajadores a cargo del biodigestor en el tema de atmósferas explosivas, la prevención y protección en caso de explosión o incendio. • Informar a los empleados de la granja y vecinos sobre la ubicación del biodigestor, para evitar que se realicen quemas controladas o se generen incendios que puedan alcanzar el biodigestor. • Identificar con señales visibles y a nivel de superficie, la ubicación de tuberías subterráneas de biogás. • Instalar avisos de seguridad que indiquen leyendas como “GAS INFLAMABLE” y “PROHIBIDO FUMAR” en las zonas donde se puedan generar atmósferas explosivas. • Señalizar el sistema de tuberías con el código de colores de acuerdo al fluido que transporta (ejemplos: amarillo-gas, verde-agua, azul-aire). Adicionalmente, se recomienda colocar una flecha sobre la tubería que indique la dirección del fluido dentro de la tubería. • Instalar los quemadores sobre una plataforma estable, metálica o de concreto localizada lo suficientemente alejada del biodigestor y de cables o tuberías aéreas. Los quemadores deberán ser diseñados de manera tal que tengan una capacidad de quema igual o mayor a la producción máxima de biogás prevista. La distancia mínima recomendada para la instalación del quemador es de 30 m del biodigestor (Ilustración 26). • Se recomienda en la medida de lo posible la instalación de un sistema de detección de gas metano y su periódica calibración.
Peligro de envenenamiento y asfixia	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con un sistema de filtro o limpieza, para reducir el contenido de humedad y de ácido sulfhídrico del biogás antes de su consumo. • El tratamiento específico de ácido sulfhídrico deberá ser diseñado en función de su concentración en partes por millón (ppm) y del volumen de biogás producido. • Cuando se vaya a hacer la quema del biogás se debe hacer en lo posible en un área con buena ventilación, debido a que, en algunos casos, y dependiendo de la técnica de remoción de H₂S quedan trazas de este gas, que en exposiciones prolongadas pueden generar afectaciones a la salud humana y de los animales en producción (aumento de índices de mortalidad). • Se recomienda, en la medida de lo posible, la instalación de un sistema de detección de ácido sulfhídrico y su periódica calibración.
Riesgo de Presencia de microorganismos Patógenos en el biofertilizante	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar periódicamente la extracción de los lodos acumulados en la parte central y baja del biodigestor, para evitar que disminuya el volumen de operación y que se produzcan obstrucciones o taponamientos por acumulación de sustrato. • Considerar el uso de técnicas de monitoreo de patógenos en el biol, o el uso de técnicas de esterilización del efluente del biodigestor con el fin de asegurar la NO presencia de patógenos en el biofertilizante.
Peligro de emisiones en suelos o aguas	<ul style="list-style-type: none"> • Instalar un cerco perimetral (malla, reja o paredes) para evitar que animales o personal no autorizado accedan al biodigestor. Esta malla debe ser de por lo menos 2 metros de altura (Ilustración 27). • Colocar avisos informativos sobre las restricciones de acceso en las puertas de entrada. • Llevar registros de las visitas de inspección y supervisión del biodigestor con su respectiva bitácora de control y registro fotográfico. • Instalar válvulas de alivio que liberen automáticamente el gas cuando el digestor alcance una presión determinada. • Cuando la membrana es de PVC, se recomienda subir a la misma con calzado apropiado para evitar rasgaduras. Se recomienda el uso de zapatos de suela lisa o de goma y el uso de prendas antiestáticas como el algodón. En caso de que la membrana sea de plástico de invernadero, no es recomendable subir sobre la misma por que es mucho menos resistente. • Restringir el acceso de personal no autorizado al biodigestor, tanto en el momento de su construcción como durante su operación.

¹¹ ATEX es una abreviatura que significa “Atmosphere Explosible”. Al mismo tiempo, ATEX es la denominación abreviada de la Directiva Europea 94/9/CE para la puesta en circulación de aparatos, componentes y sistemas de protección eléctricos y mecánicos con protección contra explosiones.

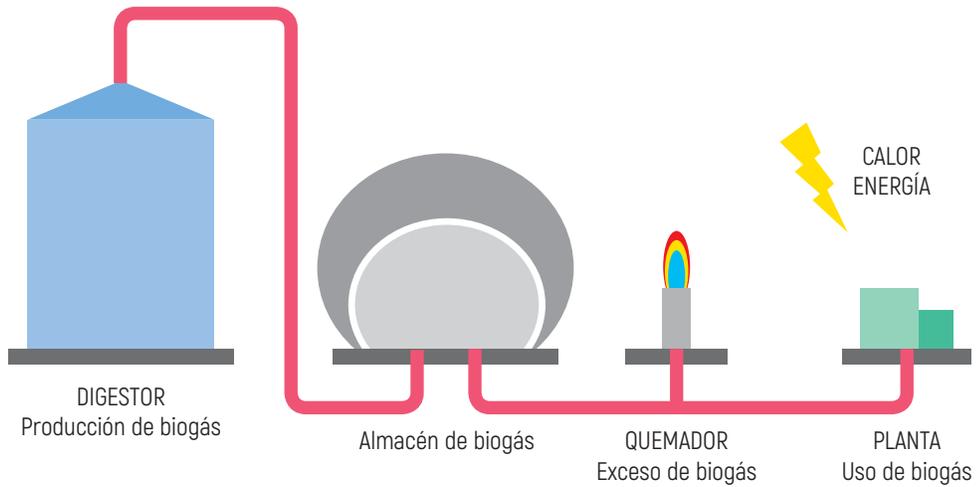
Riesgos & Peligros

Medidas de prevención

Otras medidas de prevención	<ul style="list-style-type: none"> • Construir y entregar al personal encargado del biodigestor, manual e instructivo para cada etapa del sistema de biodigestión, en función de su operación, mantenimiento y seguridad. • Eliminar cualquier acumulación de agua sobre la cubierta. • Usar elementos de protección personal como casco, overol y zapatos de seguridad dentro del área perimetral del biodigestor. • Trabajar en parejas cuando se requiera trabajar sobre la geomembrana del biodigestor (por ejemplo, para la remoción de agua lluvia) con el fin de garantizar la seguridad de los trabajadores. Los trabajadores deberán portar el equipo necesario para realizar este trabajo. • Realizar remoción de basura y escombros arrastrados por el viento. • Realizar mantenimiento programado a los equipos (bombas, sopladores, etc.) de acuerdo a las recomendaciones de los proveedores. • Realizar la regeneración o sustitución de los filtros de acuerdo a las indicaciones del proveedor. • Verificar que las trampas de condensación de agua no se encuentren saturadas. • Realizar inspecciones periódicas del estado de la cubierta, válvulas, tubería buscando detectar fugas, rasgaduras y daños en general.
-----------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 24. Esquema general de un sistema de digestión anaerobia



Fuente: (Sánchez, 2018)

Ilustración 25. Simbología para identificar los equipos permitidos para el trabajo en una atmósfera explosiva



Fuente: <https://www.iagua.es/noticias/espana/barmatec/16/09/30/que-es-certificado-atex>

Ilustración 26. Quemador



Fuente: <https://www.aqualimpia.com/>

Ilustración 27. Cerca perimetral



Fuente: Porkcolombia-FNP

7 Beneficios y ventajas de la producción de biogás

Beneficios energéticos: Como ya se enunció en la primera parte de la guía, el biogás puede ser utilizado, tanto para la generación de energía térmica como para la generación de electricidad, y dependiendo de la capacidad del biodigestor y de la cantidad de biomasa disponible, una granja puede cubrir con biogás necesidades energéticas tan básicas como cocinar, iluminar y calentar (RedBioLac, s.f.), hasta necesidades energéticas más grandes, como las relacionadas con la autogeneración eléctrica y el autoabastecimiento de combustibles para el funcionamiento de distintas clases de equipos y motores (bombeo, vehículos, refrigeración, entre otros). En las tablas 2 y 3 de la sección 1 se pueden repasar los posibles usos, consumos y valores energéticos equivalentes del biogás.

Descentralización energética y potencial de integración al Sistema Energético Nacional: Los biodigestores pueden aportar no sólo a impulsar el potencial de generación energética a partir de la biomasa no utilizada en zonas rurales vulnerables y actualmente aisladas del sistema interconectado nacional (Acosta. P & Pasqualino, 2014), sino que pueden aportar mucho a la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, a través de la conexión a la red de gas natural o a la red eléctrica del país, permitiendo robustecer el sistema de manera más sustentable.

Ahorros de dinero y generación de ingresos adicionales para el productor (principalmente en las granjas de mediana y gran escala): El poricultor puede generar importantes ahorros, o generar nuevos ingresos para la granja, por medio del uso o la venta directa del biogás, la generación de energía eléctrica para la venta o el autoabastecimiento, o por el uso o la venta del biol como abono orgánico, este último de acuerdo a la normativa vigente. En general, los principales ingresos provenientes de los biodigestores se dan vía ahorro en costos de combustibles, abonos y electricidad, aunque cuando la cantidad y la calidad del biogás lo permiten, es posible la generación de ingresos adicionales por venta de energía, combustible o abono.

Los procesos de secado, limpieza y purificación del biogás, tanto para el uso como para la venta, son necesarios, ya que lograr el máximo valor energético del biogás es importante si se quiere vender como sustituto del gas natural, o si lo que se quiere es usarlo como combustible para la generación eléctrica y la venta de electricidad.

Ahorro de tiempo y disminución de carga de trabajo (principalmente en las granjas de escala pequeña o familiar): Los usuarios de biodigestores en granjas pequeñas, ven como una de las principales ventajas de estos sistemas, el poder ahorrar el tiempo que antes utilizaban dos y tres veces al día buscando y recogiendo leña, y gastarlo en actividades más productivas y con mayor significado (Martí Herrero, 2007). La mayoría de los usuarios ven un enorme beneficio cuando encienden la estufa de biogás para cocinar justo en el momento que lo necesitan, y no tienen que gastar horas antes para encender y cuidar el fuego. Veinte (20) minutos diarios para cargar el biodigestor con estiércol y agua, reemplaza horas de

trabajo o dinero utilizado para la compra de combustible (RedBioLac, s.f.; Phanthavongs, 2013). Las mujeres y los niños particularmente, son los dos grupos más beneficiados con el uso de este tipo de tecnología, ya que son estos dos grupos los que, con más frecuencia, realizan el trabajo de búsqueda, recogida y uso de leña (RedBioLac, s.f.; Martí Herrero, 2007).

Mejoras en la salud de las mujeres y en las relaciones familiares (principalmente en las granjas de escala pequeña o familiar): Como en el punto anterior, los usuarios de biodigestores en granjas de escala familiar, y principalmente los grupos de mujeres y niños, se benefician con la instalación de biodigestores, porque en vez de usar carbón o leña para cocinar, empiezan a usar biogás, disminuyendo casi totalmente la presencia de humo y cenizas que afectan de manera importante las vías respiratorias, y la salud en general de las personas que tienen que permanecer en la cocina por muchas horas. De forma paralela, el uso del biogás hace que usar carbón ya no sea necesario, lo que mejora las condiciones de vida de muchas mujeres que se sienten mucho mejor al no tener que permanecer con sus manos y caras negras por el uso del carbón. Otra ventaja del biogás que reportan las mujeres que son usuarias, es que sus esposos se involucran más en actividades del hogar como la cocina, lo que repercute positivamente en la esfera familiar (Phanthavongs, 2013; RedBioLac, s.f.; Martí Herrero, 2007).

Mitigación de olores ofensivos, higiene, cumplimiento de la ley, y mejoras en el relacionamiento con los vecinos: En materia social, la implementación de sistemas de digestión anaerobia, hace que las relaciones entre vecinos mejoren, al mejorar las condiciones de higiene de las granjas, y permitir que el entorno de trabajo y el vecindario sea mucho más saludable, limpio y sin malos olores (Phanthavongs, 2013). En materia de higiene y de cumplimiento del marco legal, diferentes investigaciones han permitido corroborar, que los biodigestores son una excelente alternativa para el tratamiento de aguas con excretas, especialmente de origen porcino, y que la implementación de estos sistemas permite altas remociones de materia orgánica a costos muy razonables (R Chao, 2008; Pedraza, Chará, Conde, & Giraldo, 2002). Algunos trabajos han establecido que, a temperaturas ambientales de entre 18°C y 21°C y tiempos de retención de 15 días, se pueden esperar remociones mayores al 90% en la DBO, y del 85% en la DQO, lo que implica que el uso de biodigestores en granjas porcícolas permite un adecuado manejo del estiércol de los animales, evitando vertimientos de aguas que contaminen los alrededores de la granja, y que son focos de infección, plagas y contaminación (Pedraza, Chará, Conde, & Giraldo, 2002).

Beneficios ecológicos del uso de biodigestores: La adecuada gestión y el aprovechamiento de la biomasa por medio de procesos de digestión anaerobia, logra cerrar flujos de biomasa acercándose a la circularidad, además disminuye significativamente la emisión de Gases de Efecto invernadero (GEI), y genera beneficios ambientales tal y como se muestra a continuación:

- El uso de biodigestores evita la generación de emisiones de metano (CH_4) provenientes de la producción animal

- De la misma manera, el uso de biodigestores permite una adecuada gestión de la porcina, lo que reduce las emisiones de óxido nitroso (N_2O), uno de los principales causantes del cambio climático, y la contaminación de aguas y suelos por su inadecuada disposición
- El uso de biodigestores permite aprovechar la biomasa y obtener gas y abono, que son dos productos que también generan otros beneficios ambientales como los que se mencionan a continuación:
 - El uso de biogás en reemplazo de la leña, contribuye a la reducción de la quema de combustibles fósiles.
 - El uso del biol como fertilizante, no sólo es deseable por su origen natural y porque recircula nutrientes, que en otras condiciones no hubiesen podido reincorporarse al ambiente de manera adecuada, sino porque evita el uso de agroquímicos que contaminan los suelos y las aguas, y reduce el uso de fertilizantes nitrogenados que generan mayores emisiones de óxido nitroso.
 - De la misma manera, el uso del biol disminuye la necesidad de ampliar la frontera agrícola, y viabiliza el mantenimiento de áreas nativas y de conservación, al generar mejores rendimientos en las cosechas (RedBioLac, s.f.)

Producción más limpia, mejores rendimientos y reconocimiento: Los procesos de digestión anaerobia permiten cerrar ciclos de materiales y energía, y por ello, son considerados procesos de producción más limpia y sostenible. Estas prácticas son positivas, no sólo desde lo social y lo ambiental, sino también desde lo económico, en la medida que dan mayor visibilidad, posicionamiento, reconocimiento y hasta una mayor rentabilidad a quienes las implementan, y no sólo a través del bienestar animal, que aumenta, ni por la generación de ahorros en costos de producción, o a través de mejoras en los rendimientos en los cultivos, que pueden aumentar entre un 30% y 50% cuando son fertilizados con biol, sino porque pueden mejorar el precio del producto final, ya que el consumidor en la actualidad, está dispuesto a pagar mejor por productos y sistemas de producción, que se esfuercen por garantizar que su actividad se desarrolla de manera sostenible y con responsabilidad.

Accesibilidad: Los biodigestores de flujo continuo son sistemas sencillos de implementar, cuyos materiales son fáciles de conseguir, y accesibles para cualquier persona sin que necesite muchos conocimientos previos (RedBioLac, s.f.). La estrategia más acertada para su divulgación, es la instalación de uno o dos biodigestores demostrativos, de manera que exista un modelo referente a través del cual los vecinos puedan ver y entender su funcionamiento, manejo y beneficios, sin tener que asumir de entrada los costos y posibles fracasos de una instalación desinformada. Algunos estudios han demostrado que esta estrategia permite que las familias tengan la información que necesitan para tomar una decisión informada, y para que se formen criterios propios para decidir la conveniencia de la instalación de un sistema de biodigestor en sus viviendas (Martí Herrero, 2007). Autores

como Herrera (2017) recomiendan introducir dos biodigestores demostrativos a la vez en dos familias de una misma comunidad, para que se genere apoyo mutuo entre ambas familias en cuanto a trabajo, dudas y transmisión de conocimiento.

Baja inversión y mantenimiento: El costo de un biodigestor depende de su tamaño, y este a su vez, depende del clima del sitio en donde se vaya a instalar. En climas fríos, es necesario contar con sistemas de calefacción y hacer uso de invernaderos o materiales aislantes, para disminuir las pérdidas de calor en el sistema, lo que aumentan los costos del montaje. Mientras tanto en climas cálidos, su implementación es mucho más fácil y económica (RedBioLac, s.f.; D Poggio, 2019). Se estima que la inversión se recupera en dos a tres años vía ahorros en costos de combustibles, tiempo y mejora de la producción (RedBioLac, s.f.).

8 Evaluación económica de un sistema de digestión anaerobia



¿Qué se debe tener en cuenta a la hora de hacer la evaluación económica de la implementación de un biodigestor o planta de biogás?

Son varios los factores que se deben tener en cuenta, pero se debe iniciar con la identificación y selección de: i) la recolección, transporte y almacenamiento de la materia prima (biomasa), ii) almacenamiento, transporte y uso del biogás y iii) almacenamiento, transporte y uso del efluente, biol o digestato, de acuerdo con la normatividad sanitaria y ambiental vigente.

En cuanto al lugar de instalación del biodigestor o la planta de biogás hay que tener en cuenta:

- Debe estar cerca del lugar donde se consumirá el gas para evitar altos costos en tuberías y perder la presión del gas
- Se debe encontrar cerca del lugar donde se recolecta la materia orgánica (porcinaza), para reducir tiempos y costos de transporte, y para tener el sustrato disponible de manera continua
- Debe estar cerca del almacenamiento del efluente y con una pendiente adecuada para facilitar el transporte y salida del mismo.
- Debe estar por lo menos a 30 metros de cualquier fuente de agua para evitar posibles contaminaciones.
- Debe ubicarse preferiblemente protegido de vientos fríos y donde se mantenga relativamente estable la temperatura, tratando de que reciba el máximo de energía solar.

En cuanto al tipo de biodigestor, hay que definir:

- Inversión que está dispuesto a realizar
- Energía que se quiere obtener y usos de la energía generada
- La biomasa con la que se cuenta para alimentar el digestor
- El tamaño requerido del digestor
- Las características del lugar en cuanto a profundidad del nivel freático y mantos rocosos

ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES TUBULARES DE FLUJO CONTINUO

A continuación, se analizarán los costos y beneficios de la implementación de tres (3) diferentes tamaños de biodigestores tubulares de flujo continuo, y dentro del denominado sistema de bajo costo. El cálculo para cada biodigestor se hace de acuerdo a un número estimado de animales, y a una cantidad de agua residual que se supone puede ser tratada en clima cálido. Los cálculos presentados asumen pesos de 50 kilogramos en promedio por cerdo, y un gasto de agua diario de 20 litros por cada animal (Chará Orozco, 2002). Es importante tener en cuenta que los costos proyectados pueden variar con la zona de implementación del biodigestor, y con la dificultad para conseguir los materiales de construcción.

Para el análisis de los beneficios presentados en la tabla 31, también es importante tener en cuenta que la vida útil calculada para el plástico propuesto en la Tabla 30 es de cuatro (4) años, mientras que la del techo, la cerca y del resto de las instalaciones fueron de siete (7), siete (7) y diez (10) años respectivamente. Para la estimación de los beneficios del biogás también se aplicó el supuesto de que cada metro cubico de gas reemplaza 0,14 galones de diésel, y que, en el caso del biofertilizante, cada metro cubico contiene 300 gramos de nitrógeno.

Tabla 30. Costos de implementación de biodigestores plásticos de 3 tamaños por modelo de construcción artesanal¹²

Número de cerdos en clima cálido	Tamaño del biodigestor (m ³)		
	10	55	270
	36	200	1000
Excavación	\$321,598	\$1,768,791	\$8,683,158
Cajas de entrada y salida	\$218,687	\$1,369,473	\$6,102,331
Plástico	\$586,381	\$1,607,992	\$10,853,948
Conducción	\$67,214	\$488,964	\$2,042,150
Quemadores	\$80,400	\$450,506	\$1,351,517
Asistencia técnica	\$669,997	\$1,071,995	\$3,215,984
Techo y cerca protectora	\$614,119	\$1,346,961	\$5,708,372
Mantenimiento	\$128,639	\$257,279	\$771,836
Costo Total de la Inversión	\$2,558,396	\$8,104,683	\$37,957,461
Total Costos/Año	\$599,256	\$1,491,694	\$6,209,975

Fuente: (Chará Orozco, 2002)

Tabla 31. Beneficios de la implementación de biodigestores plásticos de 3 tamaños por modelo de construcción artesanal

Número de cerdos en clima cálido	Tamaño del biodigestor (m ³)		
	10	55	270
	36	200	1000
m ³ / diarios de aguas que se pueden tratar	0.83	4.58	22.5
Biogás	\$1,100,858	\$6,115,886	\$30,579,429
Efluente	\$264,751	\$1,460,915	\$7,176,976
Total beneficios/Año	\$1,365,609	\$7,576,800	\$37,756,405
Beneficios netos/Año	\$766,353	\$6,085,106	\$31,546,430
Años para recuperar la inversión	3.34	1.33	1.20
Ahorro en pago de tasas retributivas	Depende las tarifas establecidas por la autoridad ambiental local		

Fuente:(Chará Orozco, 2002)

¹² Costos actualizados a 2019 a partir de costos estimados para 2002

Los costos de implementación de un biodigestor instalado por una casa comercial, pueden ser incluso el doble de los de elaboración artesanal, sin embargo, hay que tener en cuenta que los plásticos ofrecidos por estas casas comerciales tienen una vida útil estimada de 15 años, y que este tipo de montajes no requieren de techos o cercas protectoras. En términos comparativos, en un lapso de 15 años, en el biodigestor tipo artesanal habría que cambiar el plástico del biodigestor entre 3 y 4 veces, lo que, a la larga, genera costos adicionales y casi equiparables al costo final del biodigestor comercial. Pese a que el costo de un biodigestor adquirido con una casa comercial es de casi el doble del instalado de manera artesanal, las casas comerciales ofrecen algunas garantías y ventajas que no sobra tener en consideración. Por ejemplo, generalmente ofrecen garantía sobre la calidad del plástico, y la seguridad de cambio del mismo en caso de defectos de origen en el material, también ofrecen asesoría y visitas de acompañamiento técnico dentro del valor del biodigestor. En algunos casos estas firmas comerciales ofrecen sistemas de financiación para la adquisición del sistema, lo que puede llegar a ser muy cómodo para el productor. En la Tabla 32 se pueden observar los costos aproximados de tres diferentes tamaños de biodigestores plásticos ofrecidos por casas comerciales.

Tabla 32. Costos de implementación de biodigestores plásticos comerciales de 3 tamaños por compra del biodigestor con casas comerciales

Número de cerdos en clima cálido	Tamaño del biodigestor (m ³)		
	8 - 12	40 - 60	200 - 250
	28 - 37	148 - 222	740 - 925
Costo Total de la Inversión	\$5,500,000 \$6,500,000	11,700,000 21,200,000	46,800,000 65,700,000
Total, Costos/Año	\$599,256	\$1,491,694	\$6,209,975

Fuente: Elaboración propia

Independientemente que el biodigestor elegido por el productor sea un modelo comercial o artesanal, los beneficios económicos de la implementación de estos sistemas implican que el usuario haga uso adecuado y eficiente del biogás en remplazo del combustible, y del biofertilizante generado en remplazo del fertilizante comercial; esto además de los ahorros en el pago de las tasas retributivas.

9 Incentivos para la implementación de fuentes no convencionales de energías renovables en Colombia

Los incentivos para la implementación de energías renovables representan una oportunidad al momento de invertir en proyectos basados en Fuentes No Convencionales de Energía, razón por la cual, es importante conocer, qué de acuerdo con la Ley 1715 de 2014, se establecen los beneficios o incentivos tributarios a los cuales se puede acceder por la instalación de las mismas, haciendo la salvedad **que aplicarán únicamente** si se cumple con la totalidad de requisitos establecidos por la Ley.

De acuerdo con la Ley 1715 de 2014, se establecen cuatro beneficios o incentivos tributarios, relacionados en los siguientes artículos: 11 (deducción especial de renta y complementarios), 12 (exclusión de IVA), 13 (exención del pago de derechos arancelarios de importación) y 14 (incentivo de depreciación acelerada de activos).

Los lineamientos para la aplicación de estos se establecieron mediante el Decreto 2143 de 2015 (compilado en el decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía - 1073 de 2015), con el fin de no presentar interpretaciones ajenas a la norma. Con base en lo anterior se presenta un contexto general de los beneficios tributarios, con el fin de que los productores porcícolas, evalúen la pertinencia de acceder a ellos.

1. DEDUCCIÓN ESPECIAL DEL IMPUESTO SOBRE LA RENTA Y COMPLEMENTARIOS:

De acuerdo con lo establecido en la Ley 1955 de 2019 quien modificó el Artículo 11 del Decreto 2143 de 2015, determina que este beneficio aplica para:

- a) Los contribuyentes que declaran el impuesto sobre la renta y que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir FNCE o gestión eficiente de la energía.

En este caso tendrán derecho a deducir del impuesto de renta **hasta el 50% del valor de las inversiones.**

También se deben tener en cuenta otros aspectos como:

- El valor máximo que se puede deducir es del **cincuenta por ciento (50%)** del total de la inversión realizada. en un período no mayor a cinco (5) años, contados a partir del año gravable siguiente al que se hizo la inversión,
- El valor máximo que se puede deducir por cada año gravable no puede ser superior al **cincuenta por ciento (50%)** de la renta líquida del contribuyente, antes de restar la deducción.
- Los contratos de Leasing o arrendamiento operativo no se consideran mecanismo de inversión, salvo que tengan opción de compra, para este último caso si aplican los incentivos del impuesto sobre la renta.

Para conocer los requisitos generales y específicos para optar por este beneficio, estos se encuentran estipulados en la resolución 1283 de 2016 “por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energía renovable – FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12 , 13 y 14 de la Ley 1715 y se adoptan otras determinantes”

2. DEPRECIACIÓN ACCELERADA:

Este benéfico tributario aplica para los generadores de Energía a partir de FNCE que realicen nuevas inversiones en maquinaria, equipos y obras civiles adquiridos y/o construidos con posterioridad a la vigencia de la Ley 1715 de 2014 y podre ser hasta el 20% de la tasa anual global.

Aplica únicamente para las etapas de: preinversión, inversión y operación de proyectos de generación a partir de FNCE

También se deben tener en cuenta otros aspectos como:

- El beneficiario es quien define la tasa de depreciación, que debe ser igual durante cada año gravable.

La tasa de depreciación puede ser modificada en cualquier año, siempre y cuando se le informe previamente a la Dirección Seccional de Impuestos de su jurisdicción, antes de presentar la declaración de renta del año en el que ocurrió el cambio.

Es importante resaltar que con la certificación de los beneficios ambientales para la deducción especial de Renta para proyectos de FNCER expedida por la ANLA los obligados a presentar declaración de renta y complementarios, podrán aplicar al incentivo de depreciación acelerada de activos.

3. EXCLUSIÓN DE BIENES Y SERVICIOS DE IVA:

De acuerdo con el decreto 2143 de 2015, este beneficio tributario excluirá del IVA a:

- a) La compra de equipos, elementos y maquinaria ya sean nacionales o importados,
- b) La adquisición de servicios dentro o fuera de Colombia y que se destinen a nuevas inversiones y pre inversiones para la producción y utilización de energía a partir FNCE,
- c) Los servicios dentro o fuera de Colombia destinados a la medición y evaluación de los potenciales recursos.

También se deben tener en cuenta otros aspectos como:

- Los porcicultores que estén interesados en obtener este beneficio deberán solicitar ante la UPME la actualización y ampliación de la lista de bienes y servicios excluidos de IVA y exentos de gravamen arancelario.

- Para presentar ese documento deberá contar con una relación de los bienes y servicios que se solicitan incluir, junto con una justificación técnica de su uso dentro de los proyectos FNCER.
- Para conocer los requisitos generales y específicos para optar por este beneficio, estos se encuentran estipulados en la resolución 1283 de 2016 “por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energía renovable – FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12 , 13 y 14 de la Ley 1715 y se adoptan otras determinantes”
- Y para el trámite ante ANLA se debe contar con un concepto previo de la Unidad de Planeación MineroEnergética – UPME, acorde con la Resolución 703 de 2018 “Por la cual se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los proyectos de FNCE, con miras a obtener el beneficio de exclusión de IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 17 15 de 2014”.

4. EXENCIÓN DE GRAVÁMENES ARANCELARIOS:

De acuerdo con el decreto 2143 de 2015, este beneficio tributario aplica para:

- a) Personas naturales o jurídicas titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos para el desarrollo de FNCE.
- b) Aplica para exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre-inversión y de inversión de proyectos con FNCE.
- c) Este incentivo aplicara sobre maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de estos.

Es de resaltar que de acuerdo con lo establecido en la resolución 1283 de 2016, con la certificación de beneficios ambientales para exclusión del IVA expedida por la ANLA y la certificación expedida por el Ministerio de Minas y Energía a través de la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, las personas naturales o jurídicas podrán aplicar a la exención del pago de los derechos arancelarios de importaciones de maquinarias, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión de proyectos con FNCER

Finalmente, señor porcicultor tenga en cuenta que para obtener estos beneficios es obligatorio, que cuente con los siguientes documentos base:

Si desea más información remítase a la página de la UPME <http://www.upme.gov.co/Paginas/default.aspx> y en la sección de energías renovables tendrá acceso a toda la información y normativa relacionada con esta ley.

Anexo 1. Potencial energético de la porcinaza en Colombia

Potencial por Departamentos	Peso Prom. (kg)	Antioquia	Cundinamarca y Boyacá	Valle del Cauca y Cauca	Tolima, Huila	Eje cafetero	Meta y Casanare	Atlántico y Córdoba	Arauca y Guanía	Nariño	Santanderes	Bolívar, Cesar, Magdalena y Sucre
Lechones	29	538.083	243.758	140.235	26.588	99.850	48.330	25.800	12.100	10.625	33.391	4134
Levante	30	481.386	201.182	102.072	24.708	74.448	51.738	22.351	7.743	11.128	3.604	3.889
Ceba	47	378.014	103.660	105.111	26.105	100.657	113.054	22.543	15.542	15.910	21.077	4.162
Hembras de reemplazo	120	29.991	7236	7770	1.851	4.174	6.480	2.853	4.648	2.646	2.300	1.906
Hembras de cria	250	111.445	22.523	39.155	46.768	16.518	18.004	10.648	8.204	4.524	698	3.407
Machos	240	6.379	2.267	7770	856	825	1.591	902	1.621	1.733	1.259	720
Masa ganadera (t)	80.804	25.020	24.655	14.859	14.688	13.928	5.704	4.293	3.254	2.820	1.885	1.685
Masa ganadera (UA)	161.608	50.039	49.310	29.718	29.377	27.855	11.409	8.587	6.508	5.659	3.371	3.371
Porcinaza (t/año)	3.070.543	950.745	936.895	564.634	558.157	529.252	216.771	163.182	9.789	7.420	6.429	64.047
Materia seca (t/año)	184.233	57.045	56.214	33.878	33.489	31.755	13.006	9.789	9.789	7.420	6.429	3.843
Agua (t/año)	2.886.311	893.701	880.682	530.756	524.668	497.497	203.764	153.363	116.239	100.721	100.721	60.204
Sólido Volátil (t/año)	147.386	45.636	44.971	27.102	26.792	25.404	10.405	7.831	5.936	5.143	5.143	3.074
cenizas (t/año)	36.847	11.409	11.243	6.776	6.698	6.351	2.601	1.958	1.484	1.286	1.286	769
Biogás (m ³ /año)	58.954.434	18.254.309	17.988.392	10.840.971	10.716.619	10.161.641	4.161.997	3.132.511	2.374.246	2.057.281	1.229.697	1.229.697
Metano (m ³ /año)	35.372.661	10.952.585	10.793.035	6.504.583	6.429.972	6.096.985	2.497.198	1.879.507	1.424.548	1.234.369	737.818	737.818
Energía bruta (kWh)	302.988.061.156	93.815.465.066	92.448.820.270	55.715.652.694	55.076.565.236	52.224.332.137	21.389.999.019	16.099.103.462	12.202.105.334	10.573.106.883	6.319.855.697	6.319.855.697
Energía bruta (kg GLP)	27.544.369	8.528.679	8.404.438	5.065.059	5.006.960	4.747.667	1.944.545	1.463.555	1.109.282	961.192	574.532	574.532
Energía eléctrica (kWh el/año)	133.878.446	41.453.345	40.849.479	24.618.544	24.336.157	23.075.868	9.451.395	7.113.557	5.391.628	4.671.838	2.792.494	2.792.494
Potencia instalada (kW)	17.850	5.527	5.447	3.282	3.245	3.077	1.260	948	719	623	372	372
Potencia instalada (MW)	42,4	17,9	5,5	5,4	3,3	3,2	1,3	0,9	0,7	0,6	0,4	0,4

Fuente: PorKcolombia-FNP 2018

Anexo 2. Lista de bienes y servicios excluidos del IVA y exentos de gravamen arancelario para proyectos y sistemas para uso energético en biomasa

EQUIPO	COMENTARIO/CONDICIONAL
Equipos y componentes para sistemas de biogás	
Biodigestores prefabricados	
Materiales para construcción digestores, post-digestores y tanques de almacenamiento	
Equipos de medición de producción de biogás y concentración de metano	Con límite por planta o capacidad
Equipos para desulfuración de biogás (y remoción de impurezas)	Con límite por planta o capacidad
Equipos para remoción de CO ₂ (equipos para producción)	Con límite por planta o capacidad
Ventiladores/sopladores para flujo de biogás	Con límite por planta o capacidad
Teas de emergencia	Con límite por planta o capacidad
Bombas para flujo de sustrato en plantas de biogás	Con límite por planta o capacidad
Tuberías en plantas de biogás, incluyendo tubería de polietileno de alta densidad	Con límite por planta o capacidad
Dispositivos de control y automatización de procesos anaerobios	Con límite por planta o capacidad
Generales	
Materiales para la construcción de instalaciones de recibo y acopio de biomasa para ser usada con fines energéticos	Con límite por planta o capacidad
Materiales para fundición en concreto	
Obra civil planta física	
Secadores de biomasa/ Equipos de pre-tratamiento y post-tratamiento de biomasa	Con límite por planta o capacidad
Sistemas de generación y cogeneración	
Motores de CI diseñados para operar con biogás o biocombustibles	Que vayan a ser operados exclusivamente o en más de un 50% de su producción con dicho tipo de combustible
Calderas para operar con biomasa, biogás o sus derivados, así como equipos para adaptación de calderas para uso con biomasa, biogás o sus derivados.	Si es necesario que sean calderas para operar con este tipo de combustible
Turbinas de condensación para operar con biogás	Con límite por planta o capacidad
Turbinas de contra-presión para operar con biogás	Con límite por planta o capacidad
Generadores	Con límite por planta o capacidad
Recuperadores de calor	Con límite por planta o capacidad
Sistemas de pretratamiento de agua	Con límite por planta o capacidad
Sistemas de tratamiento de gases de chimenea de las calderas	Con límite por planta o capacidad
Sistemas recuperadores de condensados	Con límite por planta o capacidad
Sistemas cerrados de refrigeración de auxiliares y turbina	Con límite por planta o capacidad

EQUIPO	COMENTARIO/CONDICIONAL
Sistema abierto de refrigeración mediante torres de enfriamiento con agua o aerocondensadores	Con límite por planta o capacidad
Sistemas de calentamiento de agua/ recuperación de agua residual	Con límite por planta o capacidad
Válvulas, reguladores, sistemas de control y otros dispositivos para la generación	Con límite por planta o capacidad
Sistema de retorno de condensado, precalentamiento y desgasificador	Con límite por planta o capacidad
Planta de tratamiento de agua	Con límite por planta o capacidad
Sistema de aire comprimido	Con límite por planta o capacidad
Sistema eléctrico, transformadores, CCMs (Centro de Control de motores), cabinas (cuadros eléctricos), motores, etc.	Con límite por planta o capacidad
Red de tierras	Con límite por planta o capacidad
Sistema de instrumentación y control, elementos primarios y finales de control, DCS (Sistema de control distribuido) y PLCs	Con límite por planta o capacidad
Sistema de combustible de apoyo	Con límite por planta o capacidad
Edificios de turbina con puente grúa, cuadros eléctricos y de control, sala de operación, oficinas, taller y almacén, laboratorio	Con límite por planta o capacidad
Sistema de racks y tuberías	Con límite por planta o capacidad
Sistemas de drenajes y canalizaciones subterráneas	Con límite por planta o capacidad
Sistema de estructuras	Con límite por planta o capacidad
Sistema de pavimentos, acerado y viales	Con límite por planta o capacidad
Activos de conexión	
Subestación, transformador	Con límite por planta o capacidad
Reguladores de frecuencia	Con límite por planta o capacidad
Cables, barraje, apantallamientos, protecciones, pararrayos, contadores, etc.	Con límite por planta o capacidad
Obra civil centro de control o subestación	Con límite por planta o capacidad
Otros	A ser sometidos a evaluación por parte de la UPME

Nota: Si desea acceder a la lista completa de los bienes y servicios excluidos de IVA y exención del gravamen arancelario ingrese al siguiente link: <http://www.upme.gov.co/Paginas/Energias-renovables.aspx> donde encontrará la resolución UPME 045 de 2016 relacionado con el procedimiento y requisitos para acceder a beneficios tributarios.

Bibliografía

- Acevedo, P. (2006). Biodigestor de doble propósito - Producción e investigación - para residuos de granja porcícola. *ION*, 19(1), 1-6.
- Gobierno de Chile, PNUD, FAO, GEF. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*.
- Rincón M., J. M., & Silvia L., E. E. (2014). *Bioneergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.
- Erlar, R. (2009). *Biogás utilization chains, Work package WP09, Deliverable D35*.
- Kaiser, F. (2017). *Tecnología de biogás en porcicultura*.
- Semana Sostenible. (26 de 09 de 2017). *Negocios Verdes. Semana Sostenible*. Obtenido de Los secretos ocultos de la biomasa: <http://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/la-biomasa-genera-energia-para-llevar-electricidad-a-zonas-apartadas/38697>
- (FNR), F. N. (2010). *Guía sobre el biogás. Desde la Producción hasta el uso*. Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ).
- Minminas, U. M. (2016). *Invierta y gane con energía. Guía Práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la ley 1715 de 2014*.
- UPME. (2016). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano-Diciembre 2016*. Subdirección de energía eléctrica - Grupo de generación. .
- ATEX. (2018). *ATEX Atmósferas Explosivas.com*. Obtenido de Normativa ATEX: <http://www.atmosferasexplosivas.com/index.php/normativaatex>
- SEMARNAT, SAGARPA. (2010). *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México*. México .
- Ministerio de Minas. (02 de 02 de 2017). *Diario Oficial de la República de Chile*. Obtenido de Normas Generales CVE 1176358: <http://www.sec.cl/sitioweb/ernc/biogas/REGLAMENTO-SEGURIDAD-PLANTAS-BIOGAS.pdf>
- Guebauer, A. (2018). Gestión para la sustentabilidad en producción porcina.
- Universidad Nacional de Colombia & TECSOL. (febrero de 2018). ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE CONVERSIÓN A BIOGÁS DE LA BIOMASA EN COLOMBIA Y SU APROVECHAMIENTO. *ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE CONVERSIÓN A BIOGÁS DE LA BIOMASA EN COLOMBIA Y SU APROVECHAMIENTO*. Bogotá, Colombia.
- Acosta. P, M., & Pasqualino, J. (Julio-Diciembre de 2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia. *TEKNOS*, 14, 27-33.

- International Institute for Environment and Development. (2013). *Domestic biogas in a changing China. Can biogas still meet the energy needs of China's rural households?* Recuperado el 25 de Junio de 2019, de <http://pubs.iied.org/pdfs/16553IIED.pdf>
- TvAgro. (27 de abril de 2015). *www.tvagro.tv*. Recuperado el 3 de junio de 2019, de Técnica para Construir Biodigestores - TvAgro por Juan Gonzalo Angel: <https://www.youtube.com/channel/UCzW1r6I07r8C2RPLZrD5lwA>
- Doug Hamilton, W. M. (5 de marzo de 2019). *Types of Anaerobic Digesters*. Recuperado el 4 de junio de 2019, de Livestock and Poultry Environmental Learning Community (LPELC): https://lpelec.org/types-of-anaerobic-digesters/#Contributors_To_This_Article
- Chará Orozco, J. D. (2002). *Biodigestor plástico de flujo continuo: investigación y transferencia en países tropicales*. (J. D. Chará, Ed.) Cali, Colombia: Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria - CIPAV.
- Burgos, P. B. (2017). *EBP*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de www.biogasenergia.cl: <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/Biogas-modulo2-Diseno-Plantas-Pequeñas-11-2017.pdf>
- RedBioLac. (s.f.). *Red de Biodigestores Para Latino América y el Caribe*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de Biodigestores: <http://redbiolac.org/biodigestores/>
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., & Giraldo, S. y. (febrero de 2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development*, 14(1).
- R Chao, R. S. (septiembre de 2008). A study on pig wastewater treatment with low cost biodigesters. *Livestock Research for Rural Development*, 20(9).
- Phanthavongs, S. a. (diciembre de 2013). Biogas digesters in small pig farming systems in Lao PDR: evidence of an impact. *Livestock Research for Rural Development*, 25(12).
- D Poggio, I. F. (septiembre de 2019). Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos. *Livestock Research for Rural Development*, 21(9).
- Marchaim, U. (1992). *Biogas processes for sustainable development*. Rome: FAO.
- Gordillo Sierra, A. R. (2019). Análisis del potencial de aprovechamiento de la porcínaza mediante digestión anaerobia para obtención de biogás en granjas porcícolas Colombianas.
- V. Casson Moreno et al. (2016). Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Renewable Energy*, 96, 1127-1134.
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (Julio de 2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614.

- García Páez, V. (s.f.). *Manual de Biogás: Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos*. Recuperado el 7 de Octubre de 2019, de https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf
- Kinyua, M., Rowse, L. E., & Ergas, S. J. (mayo de 2016). Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 896-910.
- Martí Herrero, J. (diciembre de 2007). Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia. *Livestock Research for Rural Development*, 19(12).
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación*. Ecuador: Redbiolac.
- Martí Herrero, J. (2008). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. Bolivia: GTZ PROAGRO.
- GIZ, MINENERGÍA. (2012). *Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile*. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de Ministerio de energía Gobierno de Chile: <http://www.minenergia.cl/biogaslechero/wp-content/uploads/2015/12/guiaplanificacionproyectosbiogasweb.pdf>
- Corrales, L. &. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13, 55-81.
- Universidad San Buenaventura. (s.f.). *Análisis comparativo sobre las tecnologías de la digestión anaerobia húmeda y seca*. Recuperado el 19 de Octubre de 2019, de Biblioteca digital Universidad San Buenaventura: http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/6131/1/An%C3%A1lisis%20comparativo%20sobre%20las%20tecnolog%C3%ADa_Stephanie%20Grisales%20R_2017.pdf
- GIZ, MINENERGÍA. (2012). *Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile*. Santiago de Chile.
- REN21. (2019). *RENEWABLES 2019. Global Status Report*.
- Cursos CPT. (s.f.). *Curso Construção e Operação de Biodigestores*. Recuperado el 20 de octubre de 2019, de Cursos CTP: <https://www.cpt.com.br/cursos-energiaalternativa/construcao-e-operacao-de-biodigestores>
- Gordillo Sierra et al. (2019). Análisis del potencial de aprovechamiento de la porcínaza mediante digestión anaerobia para obtención de biogás en granjas porcícolas Colombianas.
- Sánchez, E. (2018). Optimización de la gestión de estaciones depuradoras de agua residual en el área rural de Cuenca. Ecuador.
- REN21. (2018). *RENEWABLES 2018. Global Status Report*.





Asociación

porkcolombia[®]

FONDO NACIONAL DE LA PORCICULTURA

   /miporkcolombia

www.miporkcolombia.co