



Universidad de Cantabria
Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía
Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS MINEROS

**DISEÑO Y APLICABILIDAD DE
DIGESTORES TUBULARES DE BAJA
TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS CON PURINES ANIMALES**

DESIGN AND APPLICABILITY OF LOW COST TUBULAR
DIGESTORS TO PRODUCE BIOGAS WITH ANIMAL
MANURE

Autor: Darío Oreña Pérez

Tutor: Carlos Rico de la Hera

Convocatoria: Diciembre



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. RESIDUOS GANADEROS.....	3
1.1.1. CANTIDADES GENERADAS.....	3
1.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DEL GANADO VACUNO.....	6
1.1.3. PROBLEMAS AMBIENTALES	11
1.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA	17
2. BIOGÁS.....	20
2.1. VENTAJAS PARA LA SOCIEDAD.....	20
2.1.1. RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE.....	20
2.1.2. REDUCCIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO Y MITIGACIÓN DEL CALENTAMIENTO GLOBAL.....	21
2.1.3. REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS.....	21
2.1.4. CREACIÓN DE TRABAJO.....	21
2.1.5. MENOR GASTO DE AGUA.....	22
2.2. VENTAJAS PARA LOS GANADEROS.....	22
2.2.1. AYUDAS ADICIONALES PARA LOS GRANJEROS INVOLUCRADOS.....	22
2.2.2. PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES.....	22
2.2.3. CICLO CERRADO DE NUTRIENTES.....	22
2.2.4. FLEXIBILIDAD PARA USAR DIFERENTES MATERIAS PRIMAS.....	23
2.3. PRINCIPALES APLICACIONES.....	24
3. TIPOS DE REACTORES.....	25
3.1. FIXED DOME DIGESTER.....	25
3.2. FLOATING DOME DIGESTER.....	26
3.3. TUBULAR DIGESTER.....	27



4. DISEÑO DEL BIODIGESTOR TUBULAR DE POLIETILENO.....	30
4.1. TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN.....	30
4.2. ESTIÉRCOL DISPONIBLE.....	31
4.3. VOLÚMEN Y SECCIÓN EFICAZ.....	32
4.4. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	33
4.5. CÁLCULO DE LA LONGITUD.....	40
4.6. MATERIALIZACIÓN DE LA ZANJA.....	43
4.7. GASÓMETRO	45
4.8. VÁLVULA DE SEGURIDAD.....	46
5. COSTE.....	47
6. CONCLUSIONES.....	48
7. BIBLIOGRAFÍA.....	49



1. INTRODUCCIÓN

A continuación se van a exponer algunos conceptos y datos fundamentales para el desarrollo del presente trabajo, con el fin de diseñar un biodigestor rural y comprender su aplicabilidad.

Para poder realizarlo se partirá de la base, los residuos ganaderos. En primer lugar se llevará a cabo una caracterización de los mismos, desde las cantidades generadas hasta la problemática ambiental asociada a estos, pasando por su composición, ventajas e inconvenientes o los nutrientes que poseen. Es necesario también para comprender el proceso entender el concepto de la digestión anaerobia, fundamental para conseguir el objetivo final, conociendo su situación en Europa y haciendo un repaso de cómo se ha ido desarrollando en otros países. A través de ella se obtiene el biogás, que convierte el sustrato en energía renovable y fertilizantes naturales para la agricultura. Su producción tiene una serie de ventajas para la sociedad: Recurso energético renovable, reducción de los gases de efecto invernadero, reducción de los residuos, creación de trabajo y menor gasto de agua entre otros. Aunque al principio el fertilizante era tratado como un producto secundario del proceso ha ido ganando importancia hasta ponerse a la altura del biogás. Se consigue un abono orgánico natural y es una alternativa a los agroquímicos.

Una vez bien asentados los conceptos se estudian 3 modelos de biodigestores:

- Cúpula fija
- Plantas de tambor flotante
- Digestor tubular de bajo coste

En este último se centrará la atención, llevando a cabo un diseño e instalación del mismo. Será necesario calcular el ancho y el radio del tubo para determinar el volumen del cuerpo, la longitud y su sección eficaz. Se pretende cubrir las necesidades de un ganadero con 6 vacas en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Para esto hay que tener en cuenta el estiércol disponible, que dependerá del número de vacas y si estas



se encuentran estabuladas todo el tiempo o por el contrario pasan más tiempo en el campo ya que la cantidad de producto que se pueda recoger variará en función de ello.

Sabiendo la producción diaria de estiércol ya se puede comenzar el diseño. Primero hace falta calcular el volumen del digestor que albergará la mezcla, para después poder estimar la longitud. Se han estudiado las distintas posibilidades y se ha optado por construir tres biodigestores más pequeños en vez de uno de mayor tamaño, lo que permite un pequeño margen de seguridad y mayor comodidad en el mantenimiento. Hay que completar la instalación con el tanque de almacenamiento de biogás y una válvula de seguridad situada en medio de la conducción, entre el digestor y el gasómetro.

1.1. RESIDUOS GANADEROS

Hay que establecer diferencias entre los residuos ganaderos según el tipo de ganado del que procedan. La composición del abono depende de muchos factores, como por ejemplo del tipo de animal que lo produce, de su alimentación, de su estado de producción y reproducción, del sistema de recolección y del almacenamiento. Esto origina diferencias en la composición del estiércol, que tendrán su importancia en la digestión anaerobia. [2]

1.1.1. CANTIDADES GENERADAS

Una práctica muy extendida en las granjas de animales, es la adición de agua al estiércol, lo que reduce su poder fertilizante al tiempo que eleva de forma desmesurada el volumen de estiércol a recoger y almacenar, con el consiguiente aumento de los costes de tratamiento. La idea de extender diariamente el estiércol en el campo debe desecharse, ya que es una medida casi impracticable por el número de animales que integran las granjas. Por el contrario, el almacenamiento reduce el trabajo diario, disminuye el número de patógenos por el efecto del calor generado por el estiércol y da lugar a una mejor utilización de los nutrientes.



También influyen mucho en la composición los aditivos que se añaden a los alimentos con el fin de estimular la producción de leche y carne. Estos aditivos modifican el carácter de los abonos y son productos difícilmente biodegradables.

Se ha estimado que un animal produce diariamente entre un 6% y un 12% de su peso vivo en residuos fecales. [2]

Tabla 1.1- Peso y producción de excrementos del ganado vacuno. [2]

TIPO DE GANADO	PESO APROXIMADO DEL ANIMAL (Kg)	PRODUCCION MEDIA DE ESTIÉRCOL (L/d)
Terneros hasta 2 meses	73	5,0
Terneros hasta 6 meses	140	7,5
Terneras hasta 12 meses	270	15,0
Terneras hasta 18 meses	380	20,0
Terneros hasta 12 meses	400	27,0
Vaca lechera	500	41,0

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de ganado vacuno correspondiente a los 2 semestres del año 2017 en la comunidad autónoma de Cantabria:



Tabla 1.2- Número de cabezas de ganado vacuno [5]

Semestre	Tipo	
	Vacas	Vacas ordeño
	Variables	Variables
	Número de animales	Número de animales
2017		
1	145.107	53.073
2	140.933	49.917

Sabiendo que una vaca lechera produce entre 40 y 50 kg de estiércol por día se puede calcular la cantidad de abono que estas vacas produjeron en Cantabria ese año, sumando los 2 semestres:

$$(53.073+49.917) \text{ (vacas lecheras)} * 50 \text{ kg/día} * 365 \text{ días/año} = \underline{1.879.567.500 \text{ kg/año}}$$

1.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DEL GANADO VACUNO

De acuerdo con el Código de Buenas Prácticas Agrarias del Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cantabria (BOC 2.4.97) se pueden clasificar los residuos ganaderos en función de la mezcla de que se trate, de esta forma:

- Estiércol: los residuos excretados por el ganado o las mezclas de desechos y residuos excretados por el ganado, incluso transformados.
- Purines: son las deyecciones líquidas excretadas por el ganado.
- Lisier: abono producido por ganado vacuno o porcino en alojamientos que no usan mucha paja u otro material para cama. El lisier puede oscilar entre un semisólido con el 12% de materia sólida o un líquido con el 3-4% de materia sólida. [3]

En la siguiente tabla se muestra una composición típica en estiércol de ganado vacuno:



Tabla 1.3- Composición de estiércol vacuno.[3]

VACA		
	RANGO	MEDIA
Mat. Seca (%)	14,0-21,0	17,5
Ceniza (%)	2,5-5,3	4,6
Mat. Orgánica (%)	11,2-15,7	12,9
DQO (%)		7,0

Durante el almacenamiento habitual del estiércol, se produce una sedimentación de forma natural, produciéndose tres capas perfectamente diferenciadas: un lodo de excrementos al fondo, una capa intermedia perfectamente líquida y una costra de material fibroso flotando en la superficie. Esta separación es de utilidad, porque permite tratamientos distintos según el substrato.

El material fibroso, formado por las partículas de mayor tamaño del estiércol, junto con otros componentes sólidos representa la quinta parte del volumen original del estiércol.

El líquido que puede ser separado de forma mecánica, tiene como principal ventaja el poder ser bombeado fácilmente además de existir la posibilidad de tratar esta fracción líquida mediante tratamientos biológicos. El contenido de la materia orgánica del estiércol licuado (de los bovinos, los cerdos o de las aves de corral) es del orden del 6%.

El proceso de separación de estas fracciones sedimentadas se realiza muy a menudo, aunque su finalidad no sea la digestión anaerobia, sino un paso a seguir para el pretratamiento del estiércol y la distribución del abono en el campo.

También hay que destacar el contenido en nutrientes. Las principales características de los purines de ganado vacuno están recogidas en las siguientes tablas: [1]



Tabla 1.4- Composición del estiércol de vacuno en distintos países [1].

PAIS	ST (g/l)	SV (g/l)	N total (g/l)	N-NH ₄ ⁺ (g/l)
HOLANDA	77,5- 91,8	56,2-80,8	---	2,4 – 2,9
UK	---	28,1	1,7 – 2,2	---
USA	88,2	73,6	2,9	0,6
INDIA	85,1	69,8	1,2	---
SUIZA	---	43,7-64,6	1,9 – 2,8	1,0 – 1,3
ALEMANIA	85,0	69,6	2,8	0,6

En la tabla 1.4 se muestra la composición en g/L del estiércol de ganado vacuno entre los que hay que hacer notar los valores medios de 4,4 g NKT/L y 1,8 g P₂O₅/L.

Tabla 1.5- Concentraciones medias de sólidos y nutrientes en estiércol de vacuno (g/l) [1].

ST	SV	NKT	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃
95	75	4,4	1,8	5,5	2,1	1,0	1,0	3,0	1,8



Tabla 1.6- Composición típica del estiércol de vacuno y porcino en Kg/m³ [1].

	HOLANDA	SUIZA	SUIZA
	Vacas de leche	Vacas de leche	Cerdo
ST (g/l)	85,4	83	83
SV (g/l)	74,7	73	74
N-NH ₄ ⁺ (g/l)	2,2	1,5	1,9
DQO total (g/l)	101	--	--
DQO sol. (g/l)	27,6	--	--
DQO _{AGV} (g/l)	11,1	2,6	7,4
pH	7,5	7,4	7,2

Tabla 1.7- Composición, en porcentaje del total de sólidos, de las muestras de purines de vacuno. [1]

Grasa	Proteína	Carbo	Celulosa	Hemi	Lignina	Residuo
		Hidrato		Celulosa		Inorgánico
6.1	13,7	59,9	-	-	-	20,3
6.1	15,0	62,1	-	-	-	16,9
7.5	15,6	-	14,5	19,3	8,2	29,0
3.5	15,0	-	17,0	19,0	6,8	28,0
4.0	15,0	-	25,0	20,0	9,0	16,0



Tabla 1.8- Producción de residuos en kg/unidad ganadera/año [2]

	Nitrogeno (N)	Fósforo (P₂O₅)	Potasio(K₂O)
Bovino	89	40	100
Porcino	11,2	7,5	6,4
Aviar	0,72	0,75	0,36

El estiércol se almacena normalmente al aire libre, originándose la eliminación de nutrientes principalmente por tres causas:

- * Lavado por agua de lluvia.
- * Degradación por desgasificación.
- * Infiltración de líquido en el suelo.

Las pérdidas según los estudios de algunos investigadores, pueden estimarse en un 20% de nitrógeno, 5% de fósforo y 35% de potasio, durante el período invernal. Cuando los purines se almacenan en depósitos cerrados no habrá pérdidas detectables de fósforo y potasio y el nitrógeno que se pierde lo hará en forma de gas. De esta forma se observa que las pérdidas de nutrientes dependerán del período de almacenamiento, del tipo de tanque y material de construcción y de las condiciones climáticas, sobre todo la temperatura.

Los desechos animales son ricos en materias orgánicas, por ejemplo, en el caso de los bovinos: 4 % en los orines y 14 % en la bosta, con un 3 % de materias minerales en los dos tipos de deyecciones [3], de tal suerte que el contenido de materias orgánicas del estiércol licuado es del orden del 6%. Los elementos principales del estiércol sólido y



del licuado son el nitrógeno, presente esencialmente bajo la forma orgánica, el fósforo, a lo sumo dos tercios bajo forma inorgánica y el potasio.

Junto a la materia orgánica y los elementos principales, las deyecciones de los animales contienen cantidades apreciables de elementos secundarios (calcio, magnesio y sodio) y de oligoelementos (cobre, zinc e hierro principalmente).

1.1.3. PROBLEMAS AMBIENTALES

PROBLEMAS PLANTEADOS EN LOS SUELOS Y LAS AGUAS

➤ El abonado, antecedentes

Los intentos por parte del agricultor para mejorar las cosechas han sido una constante a lo largo de los tiempos, en un principio por aplicación de unos procedimientos empíricos tradicionales y, posteriormente, utilizando los recursos tradicionales derivados de un cada vez mayor conocimiento de la fisiología vegetal. Algunas de estas soluciones tradicionales - por ejemplo el empleo de estiércol y desperdicios como fertilizantes, la quema de rastrojos, o la planificación de cultivos rotatorios y períodos de barbecho - se están ofreciendo como soluciones conservacionistas novedosas en algunas regiones y países.

Con el estado de conocimientos actuales se sabe que los vegetales precisan un mínimo de 16 elementos indispensables para su normal desarrollo. Alguno de estos elementos esenciales (Fe, Zn, Mn, Co, por ejemplo) se precisan en proporciones mínimas, mientras que otros, como Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Azufre se precisan en cantidades mayores (por ejemplo, el consumo de Nitrógeno puede oscilar entre los 2.21 kg/100 kg de lechuga y los 3.8 kg/100 kg de habas).

El empleo de los fertilizantes naturales (por ejemplo el nitrato sódico o nitrochile y la roca fosfática) inició una carrera acelerada en la mejora de las características intrínsecas de los terrenos por procedimientos de mayor capacidad y rapidez que los recursos tradicionales antes mencionados. Posteriormente se utilizaron subproductos,



como el sulfato amónico obtenido de la hulla. El desarrollo de la química industrial de los fertilizantes puso en manos de los agricultores formulaciones equilibradas. En general se trata de compuestos de síntesis obtenidos a partir del amoníaco, como compuesto intermedio. Históricamente fueron los abonos sintéticos fosforados los primeros en utilizarse, luego lo fueron los que suministraban potasio y posteriormente los abonos nitrogenados, hasta llegar a las formulaciones mixtas, desarrolladas a partir de los años setenta.

Luego vendría un declive en el consumo que, junto con las anteúltimas crisis económicas y la fuerte competitividad de los abonos importados, trajo consigo el hundimiento del sector químico de los abonos.[7]

Tipos de fertilizantes:

La clasificación de los fertilizantes puede hacerse de acuerdo con varios criterios. De acuerdo con su composición química los fertilizantes se clasifican en simples y compuestos. Entre los primeros hay que citar los nitrogenados, los fosfatados y los abonos potásicos.

- Los abonos nitrogenados tienen como base la molécula del intermediario amoníaco que, cuando no es un subproducto de la industria siderúrgica, a su vez proviene del nitrógeno atmosférico y del hidrógeno obtenido por vía electrolítica o del gas de síntesis. En ocasiones se puede usar el amoníaco directamente, si bien requiere un equipamiento y unas precauciones de la aplicación que no lo hacen muy popular. El sulfato amónico es útil por su simultánea acción acidificante y por su aporte de azufre, mientras que el nitrato amónico tiene la ventaja de su doble aporte de nitrógeno amoniacal y nítrico, y la desventaja de su higroscopicidad, lo que obliga a su utilización con cargas de otros minerales, generalmente carbón o de calcio.
- Los abonos fosfatados tienen un origen en la recuperación de subproductos y en el aprovechamiento de menas fosfóricas enriquecidas por tratamiento ácido. Los fosfatos pueden seguir un ciclo de clasificación descalcificación que



permite una regulación natural de su solubilidad y, portanto, de su capacidad de ser asimilados por las plantas.

- Los abonos compuestos son generalmente mezclas, no sustancias químicas complejas, que se utilizan bien en fase sólida, bien en suspensión o disolución. Suelen ser binarios NK (Nitrato Potásico), PK (mezcla de abono fosfatado con sales potásicas, generalmente ClK) y NP (Fosfactos amónicos, obtenidos por neutralización de ácido fosfórico con amoníaco) o ternarios, NPD, representándose cuantitativamente las proporciones relativas al nitrógeno en la forma convencional P_2O_5 y K_2O . [7]

➤ Actualidad

Desgraciadamente las recomendaciones agronómicas han sido desatendidas hasta hace poco en las regiones de cría intensiva.

Además, los esparcimientos sobre las praderas, incluso inundadas o heladas, son más frecuentes. En consecuencia, aparte de la contaminación de las aguas, se observa una modificación en las características de los suelos. Cuando la aplicación de los purines se realiza de forma incontrolada sobre el medio, tiene las siguientes consecuencias:

- a) Disminución de la producción agronómica.
- b) Fitotoxicidad del campo (purines de cerdo ricos en cobre).
- c) Pérdida de nutrientes.

La contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por parte de los purines procede del almacenamiento en depósitos no adecuados, abonado de los campos en épocas inadecuadas para el cultivo, transportes deficientes y por la lixiviación de estos residuos. También constituye una práctica altamente contaminante el vertido directo en ríos y lagos. Parte de los problemas señalados se pueden resolver por medio de un almacenamiento controlado y una aplicación del purín en el campo coincidiendo con los periodos de máxima asimilación de nutrientes por parte del cultivo.



Los elementos potencialmente contaminantes cuando el purín se aplica incontroladamente, son el nitrógeno y el fósforo, ya que son los que ocasionan a corto plazo la eutrofización de las aguas. [2]

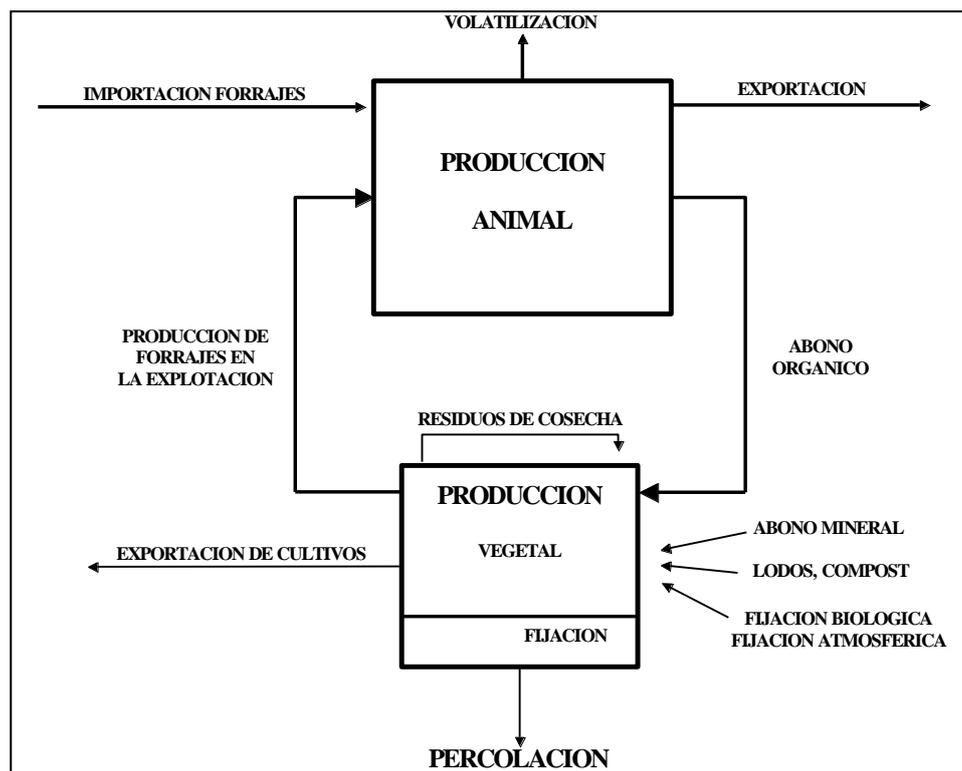


Figura. 1.1- Flujo de fertilizantes en una explotación agraria.[2]

➤ Exceso de minerales

En la producción animal, los minerales no utilizados acaban en el medio ambiente con las deyecciones. Cuando la carga de ganado no es demasiado elevada, el reciclado de los minerales no plantea apenas problemas. Por el contrario, si la carga de ganado es elevada serían aportados minerales en exceso a la explotación, apareciendo un desequilibrio. La intensificación de la fertilización de los prados y de los forrajes, así como el uso de alimentos compuestos, aumenta considerablemente el aporte de minerales, mientras que su exportación por medio de la producción animal (leche, carne) no aumenta proporcionalmente. El



excedente de minerales que resulta de ello es a veces muy importante. A esta política se debe poner un freno, por una parte reduciendo el empleo de abonos químicos y de alimentos concentrados, y por otra parte, mejorando la reutilización de los minerales de los desechos.

➤ Aporte de Nitrógeno

El nitrógeno aportado a los suelos mediante los residuos ganaderos y los fertilizantes minerales, incrementa el contenido de este elemento en él. Cuando su contenido es superior a 4 g/Kg de suelo pueden producirse efectos tóxicos.

El nitrógeno se encuentra en el estiércol en forma orgánica o amoniacal. El nitrógeno amoniacal (NH_4^+) es el que puede ser transformado en nitrato (NO_3^-) por los microorganismos nitrificantes presentes en el suelo, produciendo la acidificación del suelo (puede bajar hasta un $\text{pH}=4,0$). Estas dos formas inorgánicas del nitrógeno son las que pueden ser utilizadas por las plantas o los microorganismos para transformarlas en nitrógeno orgánico. En caso de no ser utilizado, el nitrógeno inorgánico permanece en el suelo pudiendo ser arrastrado por lixiviación y acabando en las aguas subterráneas. La presencia de nitratos en el agua potable representa un peligro y está limitada en la legislación a 50 mg/L. Cuando el suelo tenga humedad elevada y niveles bajos de oxígeno se puede dar el proceso biológico de desnitrificación liberando óxidos de nitrógeno y N_2 . La figura 10 representa el ciclo del nitrógeno.

Del nitrógeno orgánico presente en los residuos ganaderos una parte es de rápida mineralización, durante los primeros doce meses, otra parte es de lenta mineralización con una tasa de 2-3% anual.



Después de varios años de frecuentes aplicaciones de estiércol licuado, la eficacia del nitrógeno residual aumenta y, puede llegar a ser equivalente a la del nitrógeno de fácil mineralización, pudiendo generar un exceso de nitrógeno mineralizado.[4]

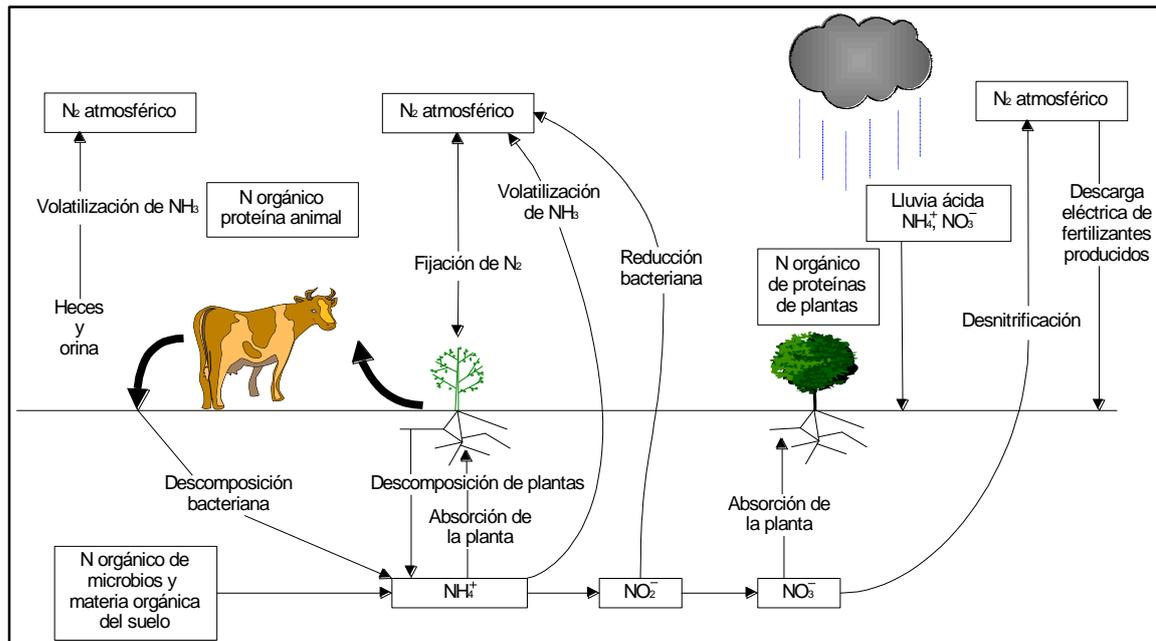


Figura 1.2- Ciclo del nitrógeno [4]

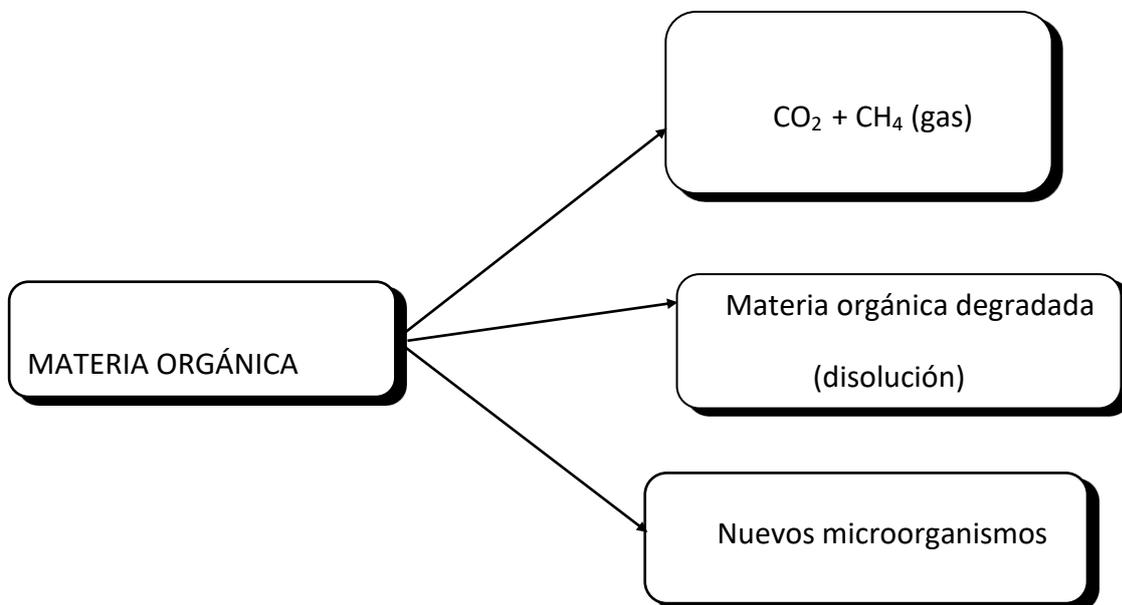
Las deposiciones de NH_4^+ son transformadas muy rápidamente en NO_3^- por nitrificación, lo cual conlleva la acidificación del suelo. Como consecuencia muchas especies vegetales de características frágiles, desaparecen. Por otro lado, se desarrollan y entran en competencia las especies tolerantes a suelos ácidos. Aquellas especies de crecimiento rápido (nitrófilas) tendrán ventajas sobre las especies de crecimiento lento.

En ecosistemas forestales, las deposiciones de cantidades importantes de amonio (NH_4^+) conllevan una secreción de potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}) en la solución del suelo. Esto significa, en definitiva, un desequilibrio nutricional para la planta, la cual repercutirá en la resistencia a flagelos, parásitos, alteraciones de tipo fisiológico y adversidades climáticas.



1.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA.

La digestión anaerobia es un proceso biológico natural en el que la materia orgánica es degradada por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, obteniéndose como productos finales una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), materia orgánica degradada y nuevos microorganismos. Las bacterias que pueden sobrevivir únicamente en ausencia de oxígeno disuelto son anaerobias obligadas.



La degradación de la materia orgánica a metano en un medio anaerobio es el resultado de una serie de reacciones bioquímicas, que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente, lo cual implica la actividad combinada de una población bacteriana muy variada, consistente en diversos grupos de bacterias anaerobias estrictas y facultativas.



TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN METANO

Las dos principales medidas de la materia orgánica que se utilizan en digestión anaerobia son el contenido en sólidos volátiles (SV) y la demanda química de oxígeno (DQO). La medida que da más información del proceso es la DQO. Al no introducir oxígeno en el digestor, la DQO se ha de mantener constante: toda la DQO que entra al digestor ha de ser igual a toda la DQO que sale del sistema, ya sea en forma de producto digerido o en forma de gases.

PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES

Los parámetros ambientales se refieren a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso.

- *pH*, que debe mantenerse cercano a la neutralidad.
- *Alcalinidad*, para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación.
- *Potencial redox*, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- *Nutrientes y relación C/N (carbono/nitrógeno)*, con valores mínimos entre 20 y 30.
- *Tóxicos e inhibidores*. La presencia de desinfectantes en los estiércoles y purines, y en menor medida de antibióticos, puede provocar problemas al desarrollo de los microorganismos. El inhibidor más importante en las deyecciones es el amoníaco, el cual aumenta a medida que lo hace el pH y la temperatura, para una concentración determinada de nitrógeno amoniacal, y no se producen problemas relevantes por debajo de 3 g N amoniacal/l.

Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores: [8]

- *Temperatura*. Puede operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35 °C) o termófilico (temperaturas



alrededor de los 55 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoniac.

- *Agitación*. En reactores en los que las bacterias se encuentren en suspensión es necesario mantener un grado de agitación moderado, suficiente para mantener las partículas en suspensión y favorecer la transferencia de materia.
- *Tiempo de retención hidráulico (TRH)*. Es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de tratamiento. La eliminación de materia orgánica presenta un aumento asintótico conforme aumenta el TRH. Para residuos agropecuarios y reactores de mezcla completa, el TRH habitual se encuentra entre 15 y 40 días, y se recomiendan valores elevados para materiales cuya fase limitante sea la desintegración e hidrólisis o con alto contenido en nitrógeno amoniacal.
- *Velocidad de carga orgánica (VCO)*. Es la cantidad de materia orgánica introducida en el digestor por unidad de volumen de reactor y tiempo. Los valores normales se encuentran por debajo de 3,5 kg DQO/m³·día.



2. BIOGÁS

Uno de los principales problemas de la sociedad de hoy en día es el crecimiento continuo de la producción de residuos orgánicos.

La producción de biogás a través de la digestión anaerobia (AD) del estiércol de los animales convierte este sustrato en energía renovable y se obtienen fertilizantes naturales para la agricultura. Al mismo tiempo elimina la parte orgánica incrementándose de esta manera la eficiencia de la transformación energética, incinerando los residuos restantes. También mejoran la economía local y el desarrollo social. [9]

2.1. VENTAJAS PARA LA SOCIEDAD

2.1.1. RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE

La energía global depende, en su mayoría, de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural...). Estos no son recursos renovables y sus reservas se están agotando debido al uso excesivo y la tardanza con la que vuelven a generarse.

Las economías mundiales dependen del petróleo crudo. Existen algunos desacuerdos entre científicos, pero según investigadores el pico de producción de petróleo ya se ha alcanzado o está a punto de alcanzarse, por lo que se espera un período de recesión hasta su completo agotamiento.

A diferencia de los combustibles fósiles el biogás sí es renovable y puede hacer una importante contribución a la preservación de los recursos naturales y a la protección del medio ambiente.[9]



2.1.2. REDUCCIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO Y MITIGACIÓN DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

La utilización de combustibles fósiles libera grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera cuya concentración produce el calentamiento global ya que es uno de los gases de efecto invernadero. La combustión de biogás también libera CO₂ sin embargo, la principal diferencia al comparar ambos es que el carbono del biogás es captado de la atmósfera en la fotosíntesis de las plantas. La producción de biogás también reduce las emisiones de metano (CH₄) y de óxido de nitrógeno (N₂O). Cuando el biogás desplace a los combustibles fósiles como forma de producción de energía y transporte las emisiones se reducirán notablemente contribuyendo a mitigar el calentamiento global.

2.1.3. REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS

Una de las ventajas de la producción de biogás es la habilidad para transformar los residuos en recursos con valor, usando la digestión anaerobia como sustrato. Muchos países Europeos se enfrentan a problemas asociados a la sobreproducción de residuos orgánicos de la industria, las casas y la agricultura.

2.1.4. CREACIÓN DE TRABAJO

La producción de biogás a partir de la digestión anaerobia requiere trabajo, colección y transporte de las materias primas, equipamiento técnico, construcción, operación y mantenimiento de las plantas de biogás. Esto significa que el desarrollo nacional del sector del biogás contribuye al establecimiento de nuevas empresas, al aumento de las ayudas en las áreas rurales y la creación de nuevos empleos.



2.1.5. MENOR GASTO DE AGUA

Incluso cuando se compara con otros biocombustibles, el biogás tiene algunas ventajas. Una de ellas es que el proceso de digestión anaerobia necesita menor cantidad de agua. Esto es un aspecto importante debido a las sequías previstas para el futuro en muchas regiones del mundo.

2.2. BENEFICIOS PARA LOS GANADEROS

2.2.1. AYUDAS ADICIONALES PARA LOS GRANJEROS INVOLUCRADOS

La producción de materias primas en combinación con la operación de las plantas de biogás hace a esta tecnología económicamente atractiva para los granjeros y los da una ayuda adicional. Estos tienen también una nueva función social importante como suministradores de energía y operadores de tratamiento de residuos.

2.2.2. PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTE

Una planta de biogás no es solo una suministradora de energía. También produce digestato, un fertilizante rico en nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes que pueden ser aplicados en suelos. Este fertilizante es más eficiente que estiércol animal usado directamente.

2.2.3. CICLO CERRADO DE NUTRIENTES

Desde la producción de materias primas hasta la aplicación del digestato como fertilizante, el biogás de la digestión anaerobia forma un ciclo cerrado de nutrientes y carbono. El metano es usado para la producción de energía y el dióxido de carbono se libera a la atmósfera, donde será captado por los vegetales durante la fotosíntesis. De esta forma los fertilizantes químicos pueden ser sustituidos por el digestato.



2.2.4. FLEXIBILIDAD PARA USAR DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

En la producción de biogás se pueden usar varios tipos de materias primas, desde el estiércol animal hasta los residuos orgánicos que producimos en casa o en las industrias alimentarias.

Otra de las principales ventajas de la producción de biogás es la capacidad de usar 'biomasa húmeda' como materia prima, con un contenido de humedad superior al 60% - 70%. En los últimos años, muchos 'cultivos energéticos' se han usado como materia prima para la producción de biogás en países como Austria o Alemania. Estos 'cultivos energéticos' son cultivos de bajo coste con poco mantenimiento que se usan para la producción de biofuels, quemándose y así generando energía eléctrica o calor.

Además de estos cultivos, el resto de residuos de la agricultura, cultivos dañados, inservibles como alimento o que no pueden crecer debido al clima, se pueden usar como biogás y fertilizantes.[9]

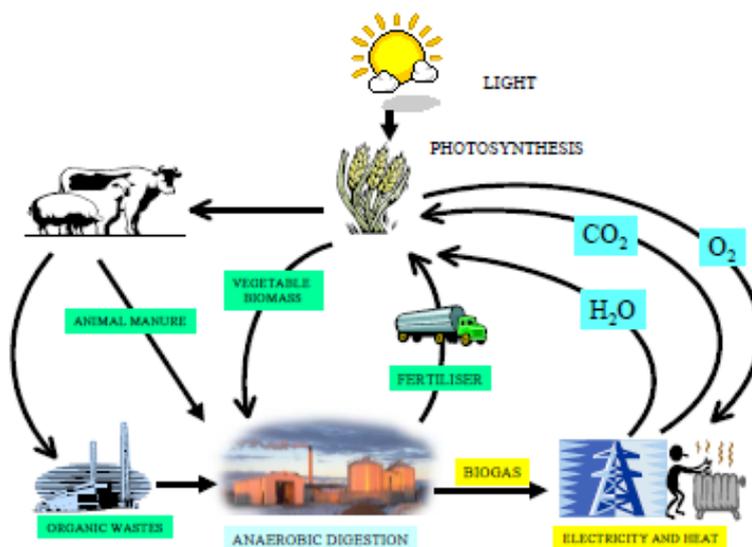


Figura 2.1. El ciclo sostenible del biogás [6]



2.3. PRINCIPALES APLICACIONES

Para sintetizar las ventajas de la sociedad y los beneficios para los ganaderos, se puede concluir que la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia es usada por la sociedad de hoy en día para el tratamiento del estiércol y la lechada. Además, en algunos países la estricta legislación ambiental ha incrementado el interés por la digestión anaerobia como una solución más económica y sostenible. Los últimos desarrollos en Europa, EEUU y otras partes del mundo han mostrado un interés creciente entre los granjeros para cosechar ‘cultivos energéticos’, usados como materia prima para la producción de biogás. La DA es una tecnología para la estabilización de aguas residuales, para el tratamiento de desechos de las industrias de procesamiento de alimentos y fermentación, así como para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales. Y una como aplicación de especial intereses se encuentra la recuperación de biogás de los vertederos. [9]



3. TIPOS DE REACTORES

Las economías más desarrolladas están enfocadas en la fabricación de digestores sofisticados para producir energía eléctrica y térmica. Sin embargo los sistemas más populares en el mundo usan tecnologías más simples y están diseñados para el uso doméstico. Más de 50 millones de sistemas como estos se han implementado, principalmente en economías menos desarrolladas.

Los reactores anaerobios están diseñados para la degradación de los microbios presentes en la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, para la producción de biogás. Además estos reactores tienen que estar protegidos contra la luz ultravioleta, químicos, gases corrosivos y aislados contra las condiciones extremas del tiempo. Lo que es común para todos ellos es que producen biogás y biofertilizantes para la agricultura.

El tamaño del reactor depende de la cantidad de residuos orgánicos que van a ser tratados, sitio, localización, consumo y de las habilidades técnicas del personal. En cuanto a los materiales los más comunes son el acero, el acero inoxidable, ladrillos y plásticos. Los reactores más usados son el fixed-dome, floating-dome y el digestor tubular. [11]

3.1. FIXED-DOME (Plantas de cúpula fija)

El típico reactor fixed-dome consiste en un compartimento cilíndrico o hemisférico construido bajo tierra. Está hecho de ladrillos y cemento. Tiene dos tanques, el tanque de mezcla y el de salida o desagüe, conectados a las válvulas de entrada y de salida del reactor respectivamente. El biogás producido se almacena en una cámara superior y a medida que la presión aumenta debido a la continua producción de gas el digestato se descarga a través de la salida por el tanque de desagüe. El uso de este tipo de reactores para la producción de biogás es una tecnología establecida en muchas



partes del mundo especialmente en China, la India; Nepal, Vietnam, Bangladesh, Camboya, Pakistán y Tanzania. Estos digestores tienen un uso principalmente doméstico, en áreas rurales debido a su larga vida útil. La construcción es una labor intensa y requiere una supervisión adecuada. Es propensa a la porosidad y las grietas como resultado de los cambios de temperatura y los terremotos. Por otra parte en las plantas de mayor tamaño se requiere tener por separado el recipiente del gas y el agitador, lo que encarece el coste.

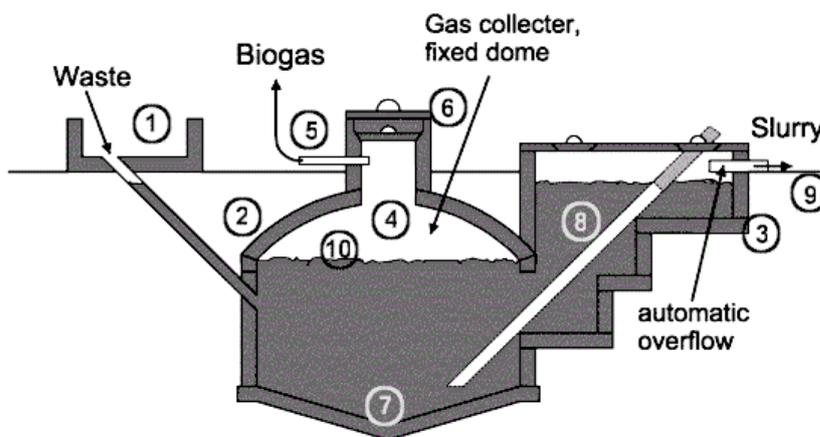


Figura 3.1. Fixed dome biogas plants [10]

1) Tanque de mezcla con tubería de entrada y trampa de arena; 2) Digestor; 3) Tanque de compensación y de eliminación; 4) Gasómetro; 5) Tubería de gas; 6) Escotilla de entrada con sello hermético; 7) Acumulación de fango espeso; 8) Tubería de salida; 9) Nivel de referencia; 10) Sobrenadante escoria interrumpido por diferentes niveles.

3.2. FLOATING-DRUM DIGESTER (Plantas de tambor flotante)

Estos reactores son similares a los fixed-dome en cuanto al funcionamiento, la mayor diferencia es el tambor flotante en la parte superior que separa la producción de gas de la colección. Están hechos de acero templado, las paredes del reactor y el fondo son de ladrillo. El reactor tiene un recipiente móvil de gas, un compartimento cilíndrico



de digestión con las tuberías de entrada y de salida conectadas. Este tipo de reactores son fáciles de manejar y el tambor permite proveer gas a una presión constante. Sin embargo, el tambor de acero es relativamente caro y requiere la eliminación del óxido y una mano de pintura regularmente para evitar fugas de gas.

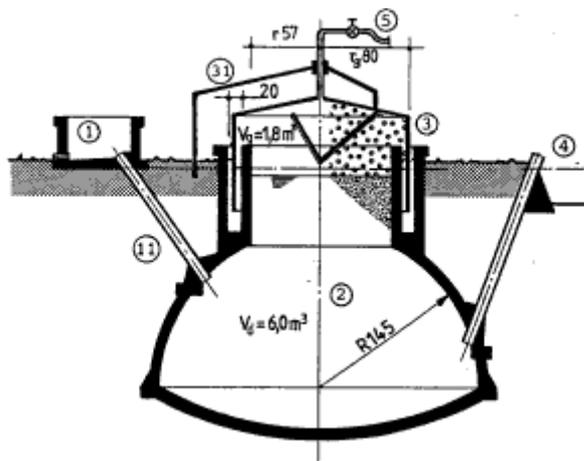


Figura 3.2. Floating-drum biogas plants [10]

1) Pozo de mezcla; 11) Tubo de llenado; 2) Digestor; 3) Gasómetro; 31) Guía de encuadre; 4) Depósito de la suspensión; 5) Tubería de gas

3.3. TUBULAR DIGESTER (Digestor tubular de bajo coste)

Se trata de un digestor de bajo coste muy común en países que están en desarrollo. El digestor está hecho con una capa doble de plástico de polietileno, cada uno tiene un grosor entre 0.15 y 0.3 mm. La entrada y la salida están construidas con tubos de 4'' a 6'' atados con bridas. El tanque se encuentra medio enterrado para mantener toda la fase líquida dentro de la zanja. La fase gaseosa, en la parte superior, se acumula y se forma una especie de campana de biogás de donde se extrae el mismo a través de una tubería de agua que generalmente está conectada a la cocina.

Hay una válvula de alivio que permite liberar el exceso de biogás producido y que no se consume. El biogás se conduce desde el digestor a dos o tres depósitos de plástico



verticales, que solían estar hechos de plástico tubular de polietileno y ahora están hechos con lona de goma sellada con calor ya que tiene una vida útil más larga.

Cada digestor se alimenta al día con 40 kg de estiércol fresco y 120 L de agua, produciendo alrededor de 1.3 m³ de biogás por día y 80 L de biofertilizante. En cada clima cambia el estándar del diseño para lograr los mismos resultados. En climas fríos, como en el altiplano, el digestor tubular es aislado del suelo e integrado en un invernadero, que se compone de paredes de adobe y se cubre con un plástico transparente. Las paredes de adobe almacenan calor durante el día y lo liberan en la noche.

El precio del material de un digestor doméstico típico está entre 220 € y 280 € dependiendo de la región climática: en climas más fríos el digestor debe ser más grande y está integrado en un invernadero. Los costes laborales totales son de 90-100 € ; 75% para la instalación y 25% para cavar la trinchera que puede ser hecha por la familia, reduciendo así el costo final en un 25%. La relevancia de esta tecnología es cada vez mayor. Dado que los digestores de bajo costo no tienen dispositivos de calentamiento activos, el clima local dicta la principal diferencia en los resultados.

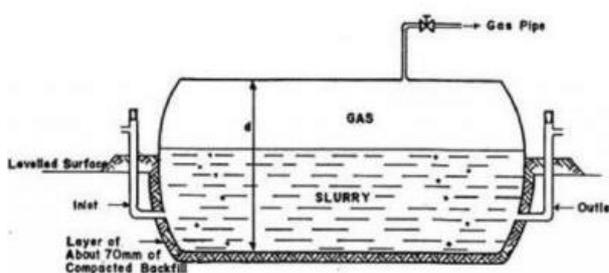


Figura 3.3. Biogás y gestión de deyecciones ganaderas [8]



Figura 3.4- Low cost tubular digesters as appropriate technology [11]

Empezando desde arriba a la izquierda: 1. digestor tubular de una región tropical (Santa Cruz); 2. Aplicación de biol (Bio-slurry) sobre cultivos de patata en el altiplano (La Paz); 3. Depósitos de biogás verticales en Viloma (Cochamaba); 4. Estufa de biogás en una casa indígena aimara en Viacha (La Paz).



4. DISEÑO DEL BIODIGESTOR TUBULAR DE POLIETILENO

Estos modelos de biodigestores se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento. Aprovechan la digestión anaerobia de las bacterias del estiércol para transformar el purín en biofertilizante que al principio se consideraba un producto secundario pero con el tiempo ha alcanzado la misma importancia que el biogás, ya que con él las familias aumentan el rendimiento de las cosechas.

El biogás producido puede utilizarse para alimentar motores que generen electricidad aparte de los usos principales: Iluminación, calefacción y combustible en las cocinas.

4.1. TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN

La mayoría de estos sistemas no posee calefacción por lo que dependiendo de la zona geográfica la producción de biogás será más o menos rápida. Cuanto menores sean las temperaturas más tiempo habrá que esperar para obtener el biogás, si estas se encuentran por debajo de los 5°C las bacterias apenas producen biogás.

Conviene estimar un tiempo de retención (duración de la digestión anaerobia) que también está condicionado por la temperatura del lugar de emplazamiento. Por lo tanto a menores temperaturas será necesario un mayor tiempo de retención y viceversa.

Para instalar este sistema en la Comunidad Autónoma de Cantabria hay que tener en cuenta su clima oceánico, templado y húmedo. Dependiendo de la zona de la región, la temperatura media en verano ronda los 22°C mientras que en invierno ronda los 0°C en Campoo y los valles del interior y los 10 °C en las comarcas litorales y resto de poblaciones. Debido a este clima el tiempo de retención se puede establecer en unos 50 días.



4.2. ESTIÉRCOL DISPONIBLE

El estiércol fresco es el ‘combustible’ que hace funcionar este instrumento. Para ello hay que tener en cuenta el número de vacas y si estas se encuentran estabuladas todo el tiempo o por el contrario pasan más tiempo en el campo, ya que de ello va a depender la cantidad de purín que se puede tratar.

Según lo desarrollado en el apartado 1.1.1 una vaca lechera produce entre 40 kg y 50 kg de estiércol diarios. Si un ganadero de la región tiene 6 vacas estabuladas permanentemente obtendrá una cantidad diaria de 300 kg (50*6). En este caso el ganadero las suele sacar a pastar durante parte del día, por lo que en cada jornada puede disponer de un 40% del estiércol total, 120 kg. Este abono contiene un 12% de MS (materia seca) y un 10 % de sólidos volátiles o materia orgánica. Cuanto más concentrado esté el estiércol, más metano se obtiene, también influye que sea fresco ya que cuando está almacenado se va degradando.

Según las condiciones en las que se encuentra este biodigestor la producción específica es de 200 L CH₄ / kg SV.

Dependiendo de la época del año las vacas pasan más o menos tiempo en la cuadra, por lo que no se puede recoger la misma cantidad de estiércol todo el año.

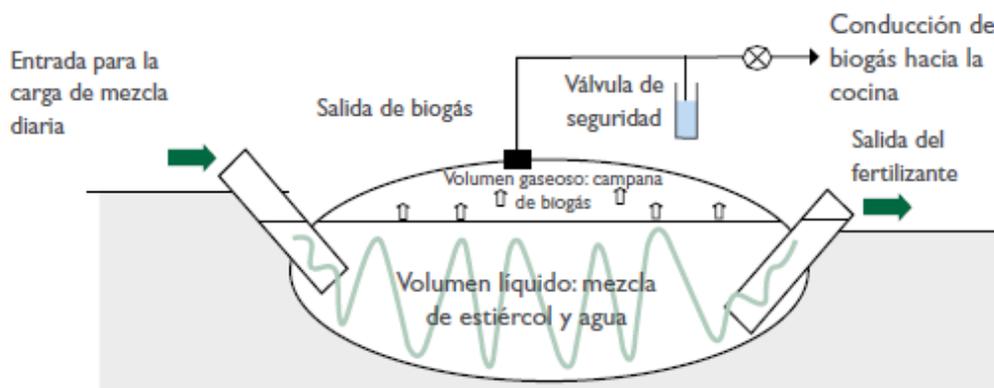


Figura 4.1- Esquema del sistema de conducción completo [12]



A medida que se forma el biogás se va acumulando en la parte superior, en la llamada campana de biogás que da forma al digestor.

4.3. VOLÚMEN Y SECCIÓN EFICAZ

El cuerpo del digestor está conectado por ambos lados a una entrada y una salida. El volúmen del cuerpo del digestor (entendido el cuerpo como el cilindro unido a la entrada y la salida) es el producto de la longitud (L) por el radio al cuadrado (r^2) y por pi (π). Primero conviene calcular la sección eficaz para luego poder tantear la longitud hasta llegar al volumen deseado.

$$-V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * L$$

$$-\text{Sección eficaz} = \pi * r^2$$

El digestor se debe cargar con una mezcla 1:3, de forma que una parte es de estiércol y 3 de agua, con el fin de diluirlo y que no se atasque. Del total del volúmen el 75 % está destinado a la fase líquida y el 25 % restante a la gaseosa, obteniéndose las siguientes relaciones. Operando queda:

$$\text{La mezcla de la carga diaria} = 120 * 3 + 120 = 480 \text{ L}$$

$$V_L = \text{Carga diaria} * \text{tiempo de retención}$$

$$V_L = 480 * 50 = 24000 \text{ L}$$

Un 25% del V_t pertenece a la parte gaseosa

$$V_g = V_t / 3 ; V_g = 8000 \text{ litros}$$

$$\text{Entonces el Volúmen final será: } V_t = V_g + V_L = 32000 \text{ L} = 32 \text{ m}^3$$



4.4. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

$$\frac{120 \text{ kg estiércol}}{\text{día}} * \frac{0.1 \text{ Kg SV}}{\text{Kg estiércol}} * \frac{200 \text{ L CH}_4}{\text{Kg SV}} = 2400 \text{ L CH}_4/\text{día} = 2.4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$$

Si se dispone de 2.4 m³ de CH₄ al día, la producción diaria de biogás serán 4 m³ con un 60 % de CH₄.

Para establecer la velocidad volumétrica de la producción de biogás:

$$\frac{\text{m}^3 \text{ gas}}{\text{m}^3 \text{ día}} = \frac{4 \text{ m}^3 \text{ biogas/día}}{32 \text{ m}^3 \text{ reactor}} = 0.125 \text{ m}^3 \text{ biogás} / \text{m}^3 \text{ reactor} * \text{día}$$

Se ha seguido el siguiente procedimiento para determinar el volumen de biogás y metano producido por el purín de vacuno a temperatura ambiente y a 37°C.

Para determinar la cantidad de biogás obtenido por una muestra de purín de vaca se utilizó la metodología del Biochemical Methane Potential test (BMP test). Se trata de un ensayo que se hace a escala laboratorio y permite averiguar la cantidad de metano que se puede obtener a partir de un substrato determinado. Se ha seguido la metodología de acuerdo a Angelidaki et al. (2009). [13]

La producción de gas fue medida manométricamente, para lo cual se requiere de un transductor de presión y ecuaciones de cálculo para convertir esa presión en volumen de gas y metano expresado a 0°C, 1 atm y sin humedad.

El test se realizó por duplicado para verificar los resultados obtenidos, representando el valor medio. Para evitar la presencia de oxígeno, el aire inicialmente presente en la fase gas fue desplazado mediante “flushing” con gas Nitrógeno.



Diseño y aplicabilidad de digestores tubulares de baja tecnología para la producción de biogás con purines animales



Figura 4.2. Sustitución del volumen de aire por nitrógeno.



Figura 4.3. Frascos en la estufa para mantener el rango mesofílico.



Figura 4.4: Midiendo la presión del biogás producido con el sensor de presión

Para analizar el contenido en metano del gas se utilizó un cromatógrafo de gases. El biogás producido se extrajo de los reactores mediante una jeringuilla.

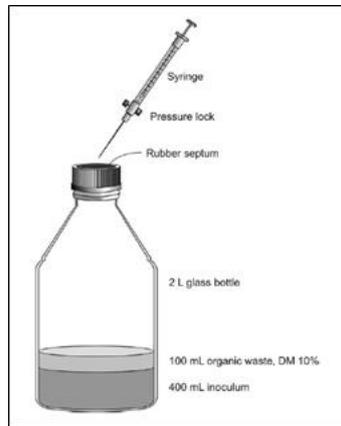


Figura 4.5: Ilustración de muestreo del reactor y el gas.



Figura 4.6: Vaciado del biogás producido.



Figura 4.7: Cromatógrafo de gases para medir la cantidad de biogás y de metano producido.

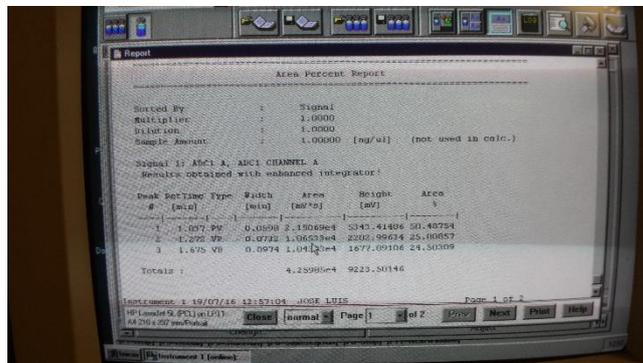


Figura 4.8: Ejemplo de la salida de datos del cromatógrafo de gases.

Al realizar el BMP test por el método Manométrico necesitamos hacer cálculos para hallar el volumen de metano acumulado. Para ello vamos a necesitar las siguientes formulas:

1. Para calcular el volumen de biogás en condiciones de presión y temperatura estándar lo haremos mediante esta fórmula:

$$V_{biogas_STP} = V_{headspace} \cdot \frac{P_{headspace}}{P_{STP}} \cdot \frac{T_{STP}}{T}$$

Donde:

- V_{biogas_STP} : Es el volumen de biogás, ajustado a presión y temperatura estándar, y que se produce entre dos operaciones de ventilación.
- $V_{headspace}$: Es el volumen del espacio de cabeza de reactor.
- $P_{headspace}$: Es la presión del espacio de la cabeza del reactor.
- T_{STP} : 273,15°K.



- P_{STP} : 1 atm, 1013,25 mbar.
- T: Temperatura del test (°K).

2. Al estar el biogás saturado de humedad el contenido en metano del biogás debe ser corregido teniendo en cuenta la saturación de humedad, mediante la siguiente formula:

$$\%CH_{4_dry} = \%CH_{4_wet} \cdot \left(1 - \frac{P_{vap}}{P_{amb} + P_{headspace}} \right)$$

Donde:

- $\%CH_{4_dry}$ es el contenido de metano del biogás en condiciones de gas seco.
- $\%CH_{4_wet}$ es el contenido de metano del biogás analizado (condiciones húmedas).
- P_{vap} es la presión de vapor del agua a temperatura de funcionamiento.

- Ecuación de Antoine para el H_2O : $P_{vap} = e^{18,3036 - \frac{3816,44}{T-46,13}}$
 $P_{vap}^{H_2O}$ [=] mm Hg
 T [=] °K

- P_{amb} es la presión ambiente (1013,25 mbar a nivel del mar).

3. Para calcular el volumen “entre pinchadas” (entre cada intervalo de tiempo de ventilación), utilizaremos la siguiente formula:

$$\Delta V_{CH_4} = \left(V_{headspace} \cdot \frac{T_{STP}}{T} + V_{biogas_STP} \right) \cdot \frac{\%CH_{4_dry_current}}{100} - \left(V_{headspace} \cdot \frac{T_{STP}}{T} \right) \cdot \frac{\%CH_{4_dry_previous}}{100}$$

Donde:



- ΔV_{CH_4} es el volumen de metano producido en cada intervalo de tiempo de ventilación.
- $\%CH_{4_dry_previous}$ es el contenido de metano del biogás (condiciones secas) al comienzo de un ciclo de ventilación ($P_{headspace} = 0$).
- $\%CH_{4_dry_current}$ es el contenido de metano del biogás (condiciones secas) al final del ciclo de purga ($P_{headspace} > 0$).

4. Para calcular la tasa de rendimiento de metano entre dos operaciones de ventilación, lo haremos mediante esta fórmula:

$$R_{CH_4} = \frac{\Delta V_{CH_4}}{\Delta t}$$

Donde:

- R_{CH_4} es la tasa de rendimiento de metano entre dos operaciones de ventilación.
- Δt es el intervalo de tiempo entre dos operaciones de ventilación.

5. Para calcular la acumulación de la producción de metano, utilizaremos:

$$V_{CH_4_cumulated} = \sum_{i=1}^n \Delta V_{CH_4_i}$$

- Los valores acumulados de la producción de metano se calculan como la suma de los valores de producción de metano individual.

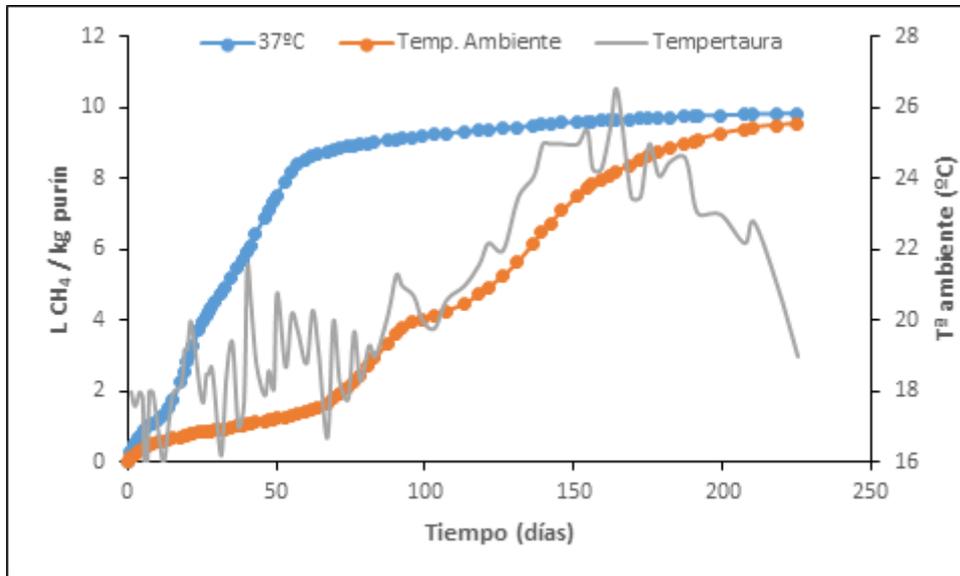


Figura 4.9- Producción acumulada de metano por kg de purín a T° ambiente y a 37°C.

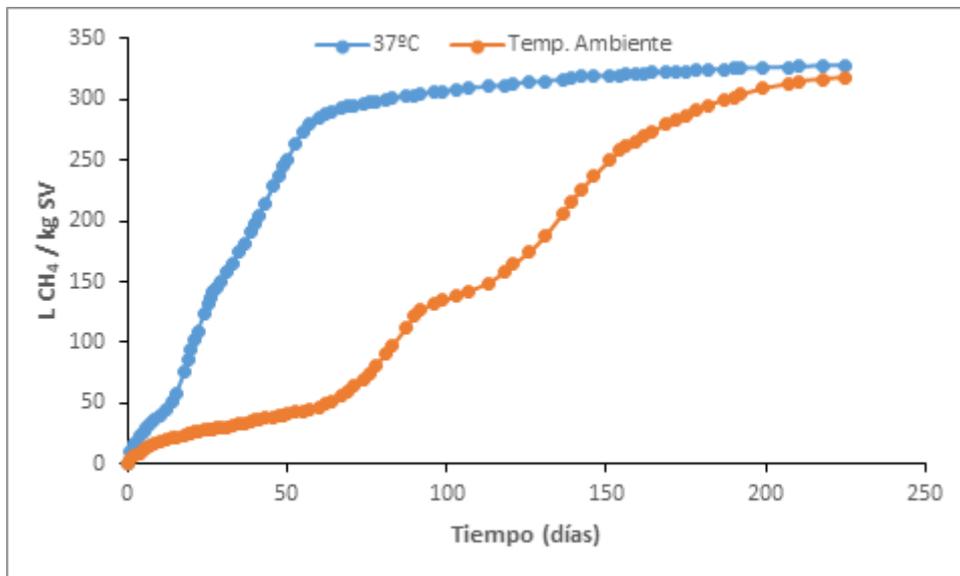


Figura 4.10- Producción acumulada de metano por kg de SV a T° ambiente y a 37°C.



4.5. CÁLCULO DE LA LONGITUD

Una vez que se conoce el volúmen del digestor y la producción de biogás se puede conseguir la longitud, para ello se estudian diferentes opciones y se elige la más conveniente. Hay que tener en cuenta que la relación entre la longitud y el diámetro debe estar entre 5 y 10, siendo 7 la mejor. A continuación se presentan las tablas con las posibles dimensiones (en metros) , las cuales se irán descartando hasta encontrar la óptima. Todas las medidas están en metros:

Tabla 4.1. Dimensionamiento del biodigestor para un volúmen de 32 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	100.48	157.75
2	4	0.64	1.27	1.27	25.12	19.72
3	6	0.96	1.91	2.87	11.16	5.84

Tabla 4.2. Dimensionamiento del biodigestor para un volúmen de 16 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	50.24	78.88
2	4	0.64	1.27	1.27	12.56	9.86
2.5	5	0.80	1.59	1.99	8.04	5.05
3	6	0.96	1.91	2.87	5.58	2.92



Tabla 4.3. Dimensionamiento del biodigestor para un volumen de 12 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	37.68	59.16
2	4	0.64	1.27	1.27	9.42	7.39
2.5	5	0.80	1.59	1.99	6.03	3.79
3	6	0.96	1.91	2.87	4.19	2.19

Tabla 4.4. Dimensionamiento del biodigestor para un volumen de 10 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	31.40	49.30
2	4	0.64	1.27	1.27	7.85	6.16
2.5	5	0.80	1.59	1.99	5.02	3.16
3	6	0.96	1.91	2.87	3.49	1.83



Tabla 4.5. Dimensionamiento del biodigestor para un volumen de 8 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	25.12	39.44
2	4	0.64	1.27	1.27	6.28	4.93
2.5	5	0.80	1.59	1.99	4.02	2.52
3	6	0.96	1.91	2.87	2.79	1.46

Tabla 4.6. Dimensionamiento del biodigestor para un volumen de 4 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	12.56	19.72
2	4	0.64	1.27	1.27	3.14	2.46
2.5	5	0.80	1.59	1.99	2.01	1.26
3	6	0.96	1.91	2.87	1.40	0.73

Tabla 4.7. Dimensionamiento del biodigestor para un volumen de 2 m³

ANCHO	PERÍMETRO	RADIO	DIÁMETRO	SECCIÓN EFICAZ	LONGITUD	RELACIÓN
1	2	0.32	0.64	0.32	6.28	9.86
2	4	0.64	1.27	1.27	1.57	1.23
2.5	5	0.80	1.59	1.99	1	0.63
3	6	0.96	1.91	2.87	0.70	0.63

Para el primer caso de 32 m³ resulta inviable construir un solo digestor ya que podría dar problemas a la hora del mantenimiento, aunque la opción para el ancho de 3 m esté dentro de las relaciones válidas no es conveniente.

La segunda opción sí cumple los requisitos, una alternativa sería construir 2 digestores de 16 m³ pero se descarta por no dejar un margen de seguridad.

De los digestores de 10m³, 8m³ y 4m³ ninguno cumple la relación longitud-diámetro exigida.

Construir muchos digestores tan pequeños, 2m³, no tiene mucho sentido. Es poco eficiente, bastante más trabajo y coste en los materiales (tubería y accesorios de gas mas arquetas de entrada y salida a los reactores).

Finalmente, para un volumen total de 32 m³, se opta por construir 3 digestores de 12 m³ con ancho 2 metros y longitud 9.42 metros. Entre todos queda algo más de 32 m³, pero eso es bueno como pequeño margen de seguridad.



4.6. MATERIALIZACIÓN DE LA ZANJA

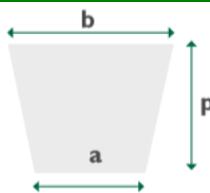
Hay dos opciones a la hora de llevar a cabo la zanja. Si se trata de un terreno duro se pueden levantar dos paredes en vez de cavar, pero si se trata de un terreno que ofrece la posibilidad de cavar se elige esta opción. Para los tubos de entrada y de salida es necesario diseñar una pendiente de unos 45°, de forma que ambas estén a la altura del nivel superior de la zanja y se permita la salida del lodo generado.

Para dotar a la zanja de mayor estabilidad, se construyen las paredes con forma de chaflán y la base completamente lisa y sin pendiente. Una vez acabada se retiran piedras y raíces. Finalmente se cubre con plásticos y sacos para poder instalar el biodigestor y que no sufra ningún corte o pinchazo.

Las dimensiones dependerán del volumen del digestor:

Tabla 4.8- Parámetros según el ancho de rollo (AR) [12]

AR (m)	2	1.75	1.5	1.25
a (m)	0.7	0.6	0.5	0.3
b (m)	0.9	0.8	0.7	0.5
p (m)	1	0.9	0.8	0,6



Según los cálculos del apartado 5.5 el ancho del biodigestor es de 2 m, por tanto las dimensiones de la zanja serán: a=0.7 m, b=0.9m y p=1m.



4.7. GASÓMETRO

Es necesario construir un depósito para almacenar el biogás. Tiene que estar bien resguardado, lejos del fuego y normalmente se coloca colgado del techo.

El diseño es prácticamente el mismo que el del biodigestor. Una entrada y una salida, se sella por los dos laterales, se doblan formando varios pliegues y se introducen en un tubo hueco, de forma que cuando el tanque alcance presiones altas el sellado pueda aguantar con mayor facilidad y permita coglarlo del techo. Ver figura 6(3).

Se contruyen tres gasómetros entre los que se reparte la producción total de biogás. (4m^3 =depósitos de 1.33 m^3)

4.8. VÁLVULA DE SEGURIDAD

Consiste básicamente en un recipiente de plástico, como una botella de refresco de 1.5L ó 2L, con un orificio en un lateral de la parte superior para ir rellenando el agua que se evapora. Se coloca al principio de la conducción, cerca del biodigestor y funciona como vía de escape del biogás en caso de que éste no se consuma, ya que si se acumula y la presión aumenta demasiado el biodigestor puede explotar.

Se conecta a la tercera salida de una T. En esta misma abertura se encuentra una pieza de tubería que queda sumergida a una profundidad proporcional a la presión que se desee ejercer, entre 8 cm y 13 cm. Los factores que influyen en la presión son: La distancia a la cocina (a mayor distancia, mayor presión hay que ejercer y por lo tanto más se tiene que sumergir la tubería) y la altura (a mayor presión mayor altura).

En la propia tubería antes de llegar a la válvula se introduce un estropajo de acero para eliminar el ácido sulfhídrico (H_2S) del biogás, protegiendo al equipo de la corrosión y evitando malos olores.

Después de la válvula se coloca una llave de paso, así se divide el digestor del resto de la conducción por si ocurriese algún contratiempo.



Diseño y aplicabilidad de digestores tubulares de baja tecnología para la producción de biogás con purines animales



Figura 4.11. Válvula de biogás [14]



5. COSTE

El rollo de polietileno tubular tiene un precio de 4,6 €/m, pero hay que tener en cuenta que los digestores llevan dos capas de rollo. Sabiendo que son tres digestores de aproximadamente 10m, al menos serán necesarios 60m de rollo más lo necesario para construir los gasómetros. En total para esta primera parte serán necesarios 400€.

En cuanto a los tubos de PVC de 6", colocados a la entrada y la salida del digestor, el precio es de 1.85€/m. Para cada digestor se necesitan 3m (1.5m para cada entrada y salida), en total 16.65€.

Por otro lado están la tubería por donde circula el biogás de 1" de sección, y el resto de accesorios: Codos, Ts y válvula. La suma de tuberías y accesorios es de 25€ por digestor, 75€ entre los tres.

Por último la obra civil: Excavar la zanja y los materiales de protección en las paredes que pueden ser hojas, mantas viejas, paja etc. Todo esto tiene coste cero ya que la zanja la cava el propio ganadero, sin necesidad de contratar ningún particular o empresa privada.

El coste final del proyecto es de 491.65€, por lo tanto cumple el objetivo propuesto, al tratarse de una inversión baja y accesible para pequeñas ganaderías.

Tabla 5.1- Inversión.

TUBO DE POLIETILENO Y GASÓMETRO	TUBOS DE PVC	TUBERÍA BIOGÁS Y ACCESORIOS	OBRA CIVIL
400 €	16.65 €	75 €	0 €



6. CONCLUSIONES

Con una inversión mínima se han conseguido diseñar 3 biodigestores que tienen la capacidad de producir 4m^3 al día de biogás para cocinar o calentar el agua durante unas 2 horas aproximadamente. En principio se iba a construir solamente uno, pero una vez hechos los cálculos y teniendo en cuenta las diferentes opciones se diseñaron 3 que tuvieran la misma capacidad que uno de 32m^3 por cuestiones de seguridad y de mantenimiento.

Conociendo la producción de estiércol diario es recomendable calcular primero el volumen y luego probar con diferentes anchos de rollo y longitudes hasta encontrar una buena relación y conseguir las dimensiones óptimas.

La Temperatura es uno de los principales factores a tener en cuenta, de ella depende el HRT (tiempo de retención hidráulico). Como se ha comprobado, la diferencia entre un purín a temperatura ambiente y otro a 37°C puede ser de unos 200 días. Por lo que la producción de biogás puede variar mucho de unas regiones a otras.

Aunque en principio el fertilizante iba a ser tratado como un producto secundario, ha pasado a tener mucha importancia ya que es más eficiente que el estiércol animal empleado directamente y aumenta la productividad de los cultivos.

Se han conseguido reducir las emisiones de CO_2 , los gases de efecto invernadero o el uso de otros materiales como la madera reduciendo los combustibles fósiles y a cambio se obtiene una energía renovable.

Cantabria es cada vez menos una región ganadera y este proyecto puede ayudar a los ganaderos a cubrir necesidades básicas con una inversión mínima que a medio-largo plazo supondrá un ahorro.



7. BIBLIOGRAFÍA

[1]Zeeman, G. (1991). Mesophilic and psychrophilic digestion of liquid manure. Ph. D. Tesis, University of Wageningen, The Netherlands.

[2]Turzo, P.E. (1998). Experiencias de la Junta de Castilla y León en planes de gestión de residuos ganaderos. 4º Curso de Ingeniería Ambiental. Aprovechamiento agronómico de residuos orgánicos. Universidad de Lérida.

[3]Frison, M. (1967). Journées d`information sur le lisier, Lyon.

[4]Kiely Gerard (1999). Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Ed. Mc Graw-Hill.

[5]Instituto Cántabro de Estadística (ICANE). [En línea] 2017. [Consulta: 17 de marzo 2018]. Disponible en: <http://www.icane.es/data/livestock-survey-bovine>

[6]Al Seadi, T 2001, Good Practice in Quality Management of AD residues from biogas production: Task 24 og AEA Technology Environment. IEA Bioenergy, England.

[7]J.L. Bueno, H. Sastre, A.G. Lavín. Principios generales y actividades contaminantes. Contaminación e ingeniería ambiental.

[8]X. Flotats. 2010. Biogás y gestión de deyecciones ganaderas.

[9]Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen. 2008. Biogas handbook.

[10][En línea] 2016. [consulta: 14 de septiembre 18]. Disponible en: https://energypedia.info/wiki/Fixed-dome_Biogas_Plants.

[12]J. Martí-Herrero. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZEnergía. Bolivia.

[11]J. Martí-Herrero, M. Chipana, C. Cuevas, G. Paco, V. Serrano, B. Zymly, K.Heising, J. Sologuren, A. Gamarra. 2014. Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. Renewable energy.



Diseño y aplicabilidad de digestores tubulares de baja tecnología para la producción de biogás con purines animales



[13] Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek and J. B. van Lier, 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59(5), 927-934.

[14] J. Martí-Herrero, R. Alvarez, M.R. Rojas, L. Aliaga, R. Céspedes, J. Carbonell. 2014. Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresurce technology*.