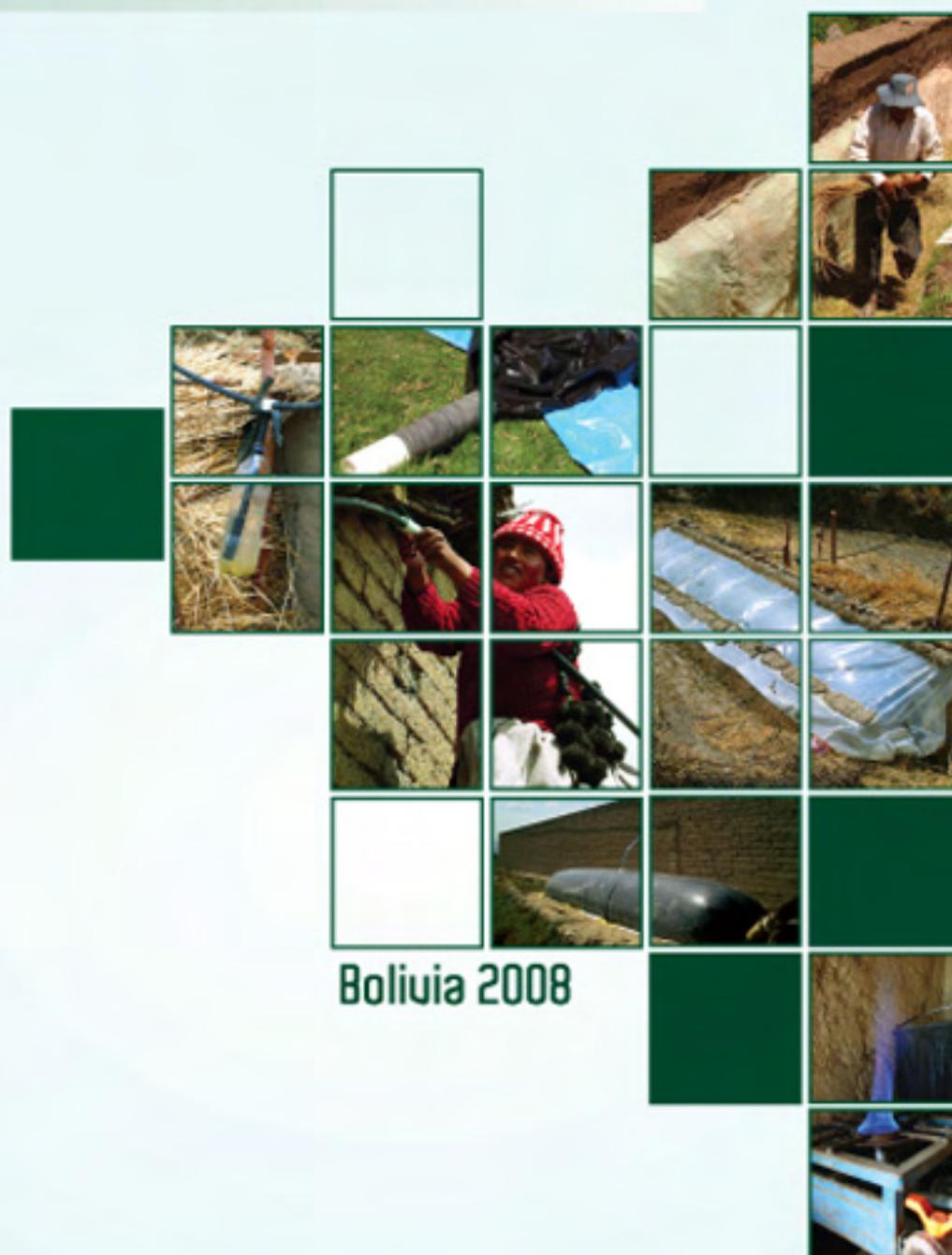


Jaime Martí Herrero



Bolivia 2008

BIODIGESTORES FAMILIARES

GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN

Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano

**Cooperación Técnica Alemana - GTZ
Programa de Desarrollo Agropecuario (PROAGRO)
Componente Acceso a Servicios Energéticos**

Calle Capitán Ravelo N° 2334 Edificio Metrobol - P.6
Teléfonos: ++ 591 (2) 2115256 - 2119499
Página web: www.endev-bolivia.org
e-mail: gtzenergia@entelnet.bo
La Paz - Bolivia



Creative Commons

Reconocimiento - No comercial - Compartir igual 2.5

Usted es libre de:

- *copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra*
- *hacer obras derivadas*

Bajo las condiciones siguientes:

Reconocimiento. *Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador.*

No comercial. *No puede utilizar esta obra para fines comerciales.*

Compartir bajo la misma licencia. *Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.*

- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*

Los derechos derivados de usos legítimos u otras limitaciones reconocidas por ley no se ven afectados por lo anterior.

ISBN: 978-99954-0-339-3

Depósito Legal: 4-I-775-08

J. Martí Herrero. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación.
GTZ-Energía. Bolivia.

*A las familias de las comunidades de
Mizque (Cochabamba, Bolivia), que
fueron las primeras en involucrarse en
este proceso de subir los biodigestores al
altiplano en 2002.*

A mis sobrinos Alejandro y Guillermo.

Contenido

| | |
|--|----|
| Prefacio | 7 |
| Agradecimientos | 9 |
| Introducción | 11 |
| 1. Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares..... | 13 |
| 2. Biodigestores familiares de bajo costo | 15 |
| 3. Diseminación de biodigestores familiares en Bolivia | 19 |
| 3.1 Situación anterior a enero 2007 | 19 |
| 3.2 Objetivo del proyecto | 19 |
| 3.3 Apoyo de la GTZ-Energía..... | 20 |
| 3.4 Estrategias de divulgación..... | 20 |
| 3.5 Estrategias de capacitación..... | 20 |
| 3.6 Estrategias de ejecución..... | 21 |
| 3.7 Sostenibilidad..... | 22 |
| 3.8 Lecciones aprendidas en divulgación y diseminación | 22 |
| 4. Guía de diseño de biodigestores familiares | 25 |
| 4.1 Conceptos en el diseño de un biodigestor familiar..... | 25 |
| 4.2 Conceptos en el dimensionado de un biodigestor familiar | 34 |
| 4.3 Esquema de metodología de diseño | 38 |
| 4.4 Ejemplo de diseño de un biodigestor | 39 |
| Anexo: Estimación del biogás diario producido | 42 |
| 5. Biodigestores familiares modelo para las tres ecorregiones..... | 45 |
| 5.1 Familias objetivo y requerimientos mínimos | 46 |
| 5.2 Biodigestores familiares de altiplano..... | 46 |
| 5.3 Biodigestores familiares de valle | 47 |
| 5.4 Biodigestores familiares de trópico..... | 48 |
| 5.5 Biodigestores para saneamiento básico de baños..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 6. Manual de instalación de biodigestores familiares..... | 51 |
| 6.1 Materiales necesarios y costo estimado..... | 52 |
| 6.2 Selección del lugar donde estará el biodigestor | 55 |
| 6.3 Dimensiones y acabado de la zanja..... | 55 |
| 6.4 Construcción del biodigestor | 57 |
| 6.5 Instalación del biodigestor | 63 |
| 6.6 Conducción de gas | 67 |
| 6.7. Mantenimiento diario y últimos detalles..... | 73 |
| 7. Nuevas ideas para construcción e instalación de biodigestores..... | 75 |
| 7.1 Ducha de agua caliente por biogás..... | 75 |
| 7.2 Producción de electricidad familiar | 75 |
| 7.3 Polietileno normal de carpa solar, protegido del sol | 75 |
| 7.4 Biodigestores para zonas inundables | 76 |
| 7.5 Mayor ganancia de radiación solar en biodigestores de altiplano | 76 |
| 7.6 Conducción de biogás más barata..... | 76 |
| 7.7 Uso de geomembrana y caucho (goma vegetal, jebe) | 77 |
| 7.8 Biodigestores semirrígidos | 77 |
| 7.9 Estudio de comercialización del fertilizante producido..... | 77 |
| 7.10 Estudio por cultivos de manejo del fertilizante..... | 78 |
| 7.11 Nuevas materias primas | 78 |
| 8. Bibliografía recomendada y comentada | 79 |
| 8.1 Manuales de instalación..... | 79 |
| 8.2 Sobre la tecnología..... | 79 |
| 8.3 Experiencia en otros países..... | 80 |
| 8.4 Páginas web de interés | 81 |
| 8.5 Videos en internet | 81 |

Prefacio

El acceso a fuentes de energía moderna en áreas rurales se ha convertido en un prerrequisito para la ejecución de medidas llevadas a cabo en pos de la disminución de los niveles de pobreza. Muchos programas y proyectos, con el soporte de organizaciones de cooperación internacional, trabajaron y trabajan en esta relación de “Energía – Pobreza” con el uso de tecnologías alternativas en búsqueda de posibilitar el acceso a fuentes confiables de energía a hogares rurales.

Pese a estos esfuerzos, en los países menos desarrollados, quedan aún millones de personas que sufren de la falta de accesibilidad a fuentes de energía moderna, situación que se debe al mismo hecho por la que es generada, es decir, los altos niveles de pobreza bajo los cuales se encuentran inmersos.

Entendiendo esta problemática, el gobierno de Alemania y Holanda -en el año 2004-, decidieron intensificar su cooperación en el área de servicios modernos de energía para la población pobre, por lo cual se firmó un acuerdo de cooperación denominado “Desarrollo Energético” (Energizing Development).

En Bolivia, la Cooperación Técnica Alemana - GTZ lleva a cabo este Programa a través del Componente Acceso a Servicios Energéticos, el cual es parte del Programa de Desarrollo Agropecuario Sostenible (PROAGRO), con una duración de cinco años (Octubre de 2005 - 2010). El objetivo del Componente es aumentar el número de personas que puedan acceder a energía moderna para satisfacer sus necesidades básicas de energía y sostenibilidad a largo plazo, permitiendo un mejoramiento significativo de la calidad de vida y la generación de nuevas actividades económicas. Es así que más de 570 mil personas se benefician con el acceso a tecnologías modernas gracias a esta cooperación. Dentro de este marco de acción, la oferta del Componente contempla cuatro líneas de acción: energía para iluminación y uso doméstico, energía para cocinar, energía para infraestructura social y energía para usos productivos.

En este sentido, y en el marco de la oferta de la línea energía para usos productivos, es que se desarrollan actividades de cooperación en la tecnología de biodigestores.

El Proyecto brinda no sólo apoyo financiero, sino también asesoramiento técnico y operativo a sus beneficiarios, al mismo tiempo que trabaja en temas relacionados a la gestión del conocimiento y el fortalecimiento de redes de actores privados y/o gubernamentales.

Dentro de este último, se trabaja directamente con demandas generadas en la gente, con una adaptación continua a sus necesidades y capacidades en el marco de la oferta, con una gran flexibilidad, concentrándose en proyectos visibles y concretos.

La presente guía es parte de este trabajo integral de apoyo con el que se pretende reforzar todas las actividades del accionar en demandas claras y concretas identificadas en poblaciones rurales pobres. Con esta publicación se busca llegar a la mayor cantidad de personas naturales y jurídicas que estén interesadas en trabajar en materia de biodigestores familiares, y al mismo tiempo crear y despertar en la población el interés por la tecnología planteada en búsqueda de una mejor calidad de vida.

Agradecimientos

Este libreto sale de un proceso muy largo y son muchas las personas cuya participación debemos agradecer. Lylian Rodríguez, TR Preston, Raúl Botero y Paul Harris por responder a todas mis dudas respecto a la tecnología desde hace siete años. Al Cabildo de Tenerife y el ITER por permitirme hacer mi primer biodigestor en las islas Canarias. A John Beckman y Oliver Campero de TED, por apoyarme logísticamente en el primer proyecto de biodigestores en Mizque y con quienes un año después hice el primer biodigestor de altiplano y funcionó. A la Asociación de Productores de Leche de Mizque, y especialmente a la familia Delgadillo, la familia Arias y la familia de Dora Acuña por su apoyo y cariño durante aquellos meses y estos años.

Gracias a todas esas familias bolivianas que creyeron en los biodigestores y con quienes - juntos - hemos ido aprendiendo más y mejor sobre la tecnología. Gracias a las más de 100 instituciones que han participado en los talleres sobre biodigestores, por su interés y apoyo y especialmente a todos los asistentes, que fueron los que más demandaron este tipo de libreto.

Gracias a Alessio Bonatti de GVC, Mirko Bellot de ADIO, Andreas Oberascher de Complejo Solar, Federico Peduzzi y Santos Flores Soto de ACRA, Judith Ramirez de ITDG-ISF, Cristina Cugat, Davide Poggio, David Villen de ISF y Juan Carlos Mejía del CIAT, por apostar por esta tecnología y comenzar los primeros proyectos de sus instituciones y compartir las experiencias. Gracias a Samay Schütt del DED por sus aportes en la construcción de una estrategia social de democratización de la tecnología. A Miguel Verweij de SNV por mostrar el camino a introducir los Mecanismos de Desarrollo Limpio a los biodigestores en Bolivia. A Walter Canedo de la Universidad Mayor de San Simón por compartir sus experiencias anteriores con biodigestores.

Gracias a Pacífico Lima, “líder tecnológico” de la Comunidad Belen Iquiaca, por fomentar el desarrollo del primer proyecto de biodigestores directamente gestionado por la propia comunidad. Gracias a David Cahuaya, Ricardo Mamani y Luis Mamani del Viceministerio de Turismo, las asociaciones de productores de leche FELDELPAZ, APLEPO, ASOPLE, ADEPLECH etc., así como las empresas PIL Andina, PIL Chuquisaca y Delizia, por apostar por esta misma línea de autogestión de proyectos de biodigestores. Gracias a Ruth Callisaya por iniciar un proyecto autogestionado en su comunidad Chahaira Pampa.

Gracias a mi familia por aguantarme y a mis amigos por soportarme, y a todos ellos por apoyarme.

Gracias a Leyre y Rafa y todos los demás cooperantes.

Gracias a Bernhard Zyma por su apoyo, confianza y libertad en comenzar el área de biodigestores dentro de la GTZ-Energía. Gracias a todos mis compañeros y compañeras del Componente. A Natalie Pereyra por la revisión de este texto. A Marc, María y Carlos por involucrarse en este proceso.

Gracias a la GTZ, y al financiamiento holandés, por apostar claramente por la divulgación, transferencia tecnológica y democratización de los biodigestores familiares de bajo costo en Bolivia.

Y gracias en general a aquellos que me han acompañado y comparten sus experiencias.

Introducción

En su primera visita, en el mes de enero de 2007, Jaime Martí nos ofreció introducir biodigestores para mejorar el suministro de energía al sector productivo de Bolivia; esta tecnología se ajusta al trabajo ejecutado por las cuatro líneas de acción del Componente Acceso a Servicios Energéticos.

Con amplio conocimiento de los problemas de sostenibilidad y apropiación de anteriores proyectos de biodigestores en diferentes países, Jaime Martí demostró entusiasmo y convicción al proponer modelos modernos, orientados a las necesidades y peculiaridades geográficas de las distintas poblaciones de Bolivia.

Convencidos con la propuesta, decidimos implementar un proyecto piloto en una de las áreas más complicadas, como es la región de Palca del departamento de La Paz, la cual se encuentra a una altura de más de 4.200 metros sobre el nivel del mar. Posterior a los tres meses, la respuesta positiva de las familias y la adaptación de biodigestores en zonas de características extremas consolidaron su propuesta.

Conjuntamente con esta iniciativa, continuamos trabajando en más regiones con todo el apoyo de nuestro equipo. Una de las herramientas exitosas, fue la organización de talleres de capacitación en la construcción de biodigestores familiares de bajo costo, con el concepto “democratizando la tecnología”. A principios del 2008 se consiguió que más de 200 técnicos de municipios, asociaciones, ONG’s y grupos sociales fueran capacitados. Gracias a la creciente demanda, tenemos previsto alcanzar a beneficiar a 1.000 familias para que introduzcan biodigestores hasta el año 2010.

El éxito de Jaime Martí Herrero, radica en facilitar el conocimiento técnico y práctico a las familias del área rural, para que puedan construir y mantener los biodigestores en sus hogares mejorando la calidad de vida y su productividad.

El presente texto es una herramienta completa para las personas que tienen la intención de introducir y conocer esta tecnología. Las experiencias narradas, resultan de gran utilidad a todas las regiones de Bolivia y países que presenten similares características geográficas.

Finalmente, deseamos agradecer a Jaime Martí, por demostrar en todo momento compromiso con su trabajo, en beneficio de la población boliviana.

Bernhard Zymła
Asesor Principal
Componente Acceso a Servicios Energéticos
PROAGRO - GTZ

I. Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares

Este documento pretende divulgar una tecnología apropiada, como son los biodigestores, entre las personas interesadas, tanto en su diseño como en su instalación y manejo.

Este documento está basado principalmente en la experiencia de siete años de trabajo con biodigestores familiares, tanto a nivel práctico como a nivel académico. La experiencia más relevante ha sido lograr hacer funcionar un biodigestor familiar a 4.100 metros de altura sobre el nivel del mar, el 2003 en Pongo, (Cochabamba, Bolivia). Actualmente ya son cientos los biodigestores que están funcionando a estas alturas en Bolivia bajo el diseño propuesto en este documento.

Mucha es la bibliografía que existe sobre biodigestores, en muchos casos la información es muy técnica y poco accesible para aquellos que simplemente quieren instalar un biodigestor familiar o conocer sobre el tema. Es cierto que existen varios manuales de instalación, muy didácticos, directos y prácticos, pero en ellos normalmente no se explica bien como diseñar un biodigestor de polietileno tubular. Es por eso, que este documento seguramente no aporte nada nuevo que no esté ya escrito en algún lugar, pero sí trata de recopilar la parte más práctica de toda esa información, filtrarla por la experiencia propia, y divulgar desde el diseño hasta la instalación de biodigestores.

El documento se ha dividido en cinco capítulos principales:

- **Biodigestores familiares de bajo costo:** donde se hace un breve repaso a la tecnología, sus beneficios, sus técnicas sociales, construcción e instalación, como introducción al tema.
- **Diseminación de biodigestores familiares en Bolivia:** se explica la estrategia de diseminación a nivel nacional de Bolivia, así como las lecciones aprendidas.
- **Guía de diseño de biodigestores familiares:** donde se dan todas las claves para aprender a diseñar un biodigestor familiar para el caso concreto que cada uno desee, aportando al final tres ejemplos de diseño.
- **Diseminación de biodigestores familiares en Bolivia:** donde se resume la estrategia de diseminación, divulgación y difusión de la tecnología entre las familias.
- **Biodigestores familiares tipo para las tres ecorregiones:** se aporta la solución de diseño de biodigestores familiares de Altiplano, Valle y Trópico, para que sirvan de “modelo”.
- **Manual de instalación de biodigestores familiares:** se aporta un nuevo manual, pues ya existen varios y buenos, en el que se describe la técnica empleada en la instalación, con alguna diferencia respecto a los manuales más conocidos.

- **Nuevas ideas para la construcción e instalación de biodigestores:** donde se plantean posibles líneas abiertas, algunas ya desarrolladas en otros países, para poder seguir desarrollando esta tecnología.
- **Bibliografía recomendada y comentada:** se hace un repaso a la bibliografía, sobre todo accesible desde internet, respecto a los biodigestores, en particular, los de polietileno tubular.

2. Biodigestores familiares de bajo costo¹

Un biodigestor es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en biogás y fertilizante. El biogás puede ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar para alimentar un motor que genere electricidad. El fertilizante, llamado biol, inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se está tratando con la misma importancia, o mayor, que el biogás, ya que provee a las familias de un fertilizante natural que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas.

Los biodigestores familiares de bajo costo han sido desarrollados y están ampliamente implementados en países del sureste asiático, pero en América Latina, solo países como Cuba, Colombia y Brasil tienen desarrollada esta tecnología. Estos modelos de biodigestores familiares, construidos a partir de mangas de polietileno tubular, se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción. Por ello se consideran una “tecnología apropiada”.

Las familias dedicadas a la agricultura, suelen ser propietarias de pequeñas cantidades de ganado (dos o tres vacas por ejemplo) y pueden, por tanto, aprovechar el estiércol para producir su propio combustible y un fertilizante natural mejorado. Se debe considerar que el estiércol acumulado cerca de las viviendas supone un foco de infección, olores y moscas que desaparecerán



Figura 1: Biodigestor familiar de bajo costo instalado en Pakuani (La Paz, Bolivia) a 4.221 metros sobre el nivel del mar. Este biodigestor produce biogás suficiente para cocinar 4-5 horas al día, alimentándolo con 20 kg de estiércol fresco y 60 litros de agua diariamente. Produce además 80 litros de fertilizante al día. Como curiosidad, este es el biodigestor más alto del mundo funcionando.

¹ Sección extraída del artículo : Martí Herrero J 2007: Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia. *Livestock Research for Rural Development. Volume 19, Article #192.*

al ser introducido el estiércol diariamente en el biodigestor familiar. También es importante recordar la cantidad de enfermedades respiratorias que sufren, principalmente las mujeres, por la inhalación de humo al cocinar en espacios cerrados con leña o bosta seca. La combustión del biogás no produce humos visibles y su carga en ceniza es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera.

Son tres los límites básicos de los biodigestores: la disponibilidad de agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el biodigestor, la cantidad de ganado que posea la familia (tres vacas son suficientes) y la apropiación de la tecnología por parte de la familia.

Este modelo de biodigestor consiste en aprovechar el polietileno tubular (de color negro en este caso) empleado en su color natural transparente en carpas solares, para disponer de una cámara de varios metros cúbicos herméticamente aislada. Este hermetismo es esencial para que se produzcan la reacciones biológicas anaeróbicas (Botero & Preston, 1987).



Figura 2: Cocina metálica adaptada para funcionar con biogás.

El film de polietileno tubular se amarra por sus extremos a tuberías de conducción, de unas seis pulgadas de diámetro, con tiras de liga recicladas de las cámaras de las ruedas de los autos. Con este sistema, calculando convenientemente la inclinación de dichas tuberías, se obtiene un tanque hermético. Al ser flexible el polietileno tubular es necesario construir una 'cuna' que lo albergue, ya sea cavando una zanja o levantando dos paredes paralelas.

Una de las tuberías servirá como entrada de materia prima (mezcla de estiércol con agua de 1:4 o 1:3 según el tipo de estiércol). En el biodigestor se alcanza finalmente un equilibrio de nivel hidráulico, por el cual, tanta cantidad de estiércol mezclado con agua es agregada, tanta cantidad de fertilizante sale por la tubería del otro extremo.

Debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la cámara hermética, las bacterias anaerobias contenidas en el propio estiércol comienzan a digerirlo. El producto gaseoso llamado biogás, realmente tiene otros gases en su composición como son el dióxido de carbono (20-40%), nitrógeno molecular (2-3%) y sulfhídrico (0,5-2%), siendo el metano el más abundante con un 60-80%.

La conducción de biogás hasta la cocina se hace de manera directa, manteniendo todo el sistema a la misma presión: entre 8 y 13 cm de columna de agua dependiendo la altura y el tipo de fogón. Esta presión se alcanza incorporando en la

conducción una válvula de seguridad construida a partir de una botella de refresco. Para hacerla se incluye una 'tee' en la conducción, y mientras sigue la línea de gas, al tercer extremo de la tee se le conecta una tubería que se introduce en el agua contenido en la botella unos 8 a 13 cm. También se añade un reservorio, o almacén de biogás, en la conducción, permitiendo almacenar unos 2 a 3 metros cúbicos de biogás.

Estos sistemas adaptados para altiplano han de ser ubicados en 'cunas' enterradas para aprovechar la inercia térmica del suelo, o bien dos paredes gruesas de adobe en caso que no se pueda cavar. Además se les encierra a los biodigestores en un invernadero de un sola agua, soportado sobre las paredes laterales de adobe de 40 cm de grosor. Estos tapias de adobe laterales acumularán el calor del efecto invernadero, de manera que en las noches de helada mantendrán al biodigestor, aún en funcionamiento, por su gran inercia térmica. En el caso de biodigestores de trópico o valle, el invernadero es innecesario y de hecho, hay que proteger el biodigestor de los rayos directos del sol.

Los costos en materiales de un biodigestor pueden variar de 135 dólares para el trópico a 220 dólares para el altiplano, ya que en la altura tienen mayores dimensiones y requieren de carpa solar.

3. Diseminación de biodigestores familiares en Bolivia

Nunca hubo un proyecto de difusión de bicicletas, ni estas fueron subsidiadas para su compra y -por ser una tecnología apropiada- las familias de todo el mundo han asumido el costo total y se han apropiado de la tecnología. Lo mismo debería suceder en un futuro con los biodigestores.

3.1 Situación anterior a enero 2007

En 2002 se realiza el primer proyecto de biodigestores en Bolivia en alturas superiores a los 2000 msnm. Este siempre fue el límite teórico de la tecnología a nivel internacional. En 2003 se realiza la transferencia de la tecnología a una ONG de Cochabamba. Ese mismo año se instala un biodigestor a 4100 msnm que funcionó, demostrando que la tecnología no está limitada en altura y que solo hay que considerar nuevas técnicas en su construcción. Durante 2004-2006, validada la tecnología para todas las regiones de Bolivia (altiplano, valle y trópico), se realizaron proyectos de implementación de biodigestores. Desde 2002 a 2006 se instalaron unos 250 biodigestores entre los departamentos de Cochabamba y La Paz, debido a que solo existía una institución capacitada ejecutando proyectos.

3.2 Objetivo del proyecto

Convertir a los biodigestores familiares en una herramienta más dentro de los usos productivos de las familias del área rural de Bolivia, donde el conocimiento sea transferido de campesino a campesino, sin dependencia exterior:

- **A corto plazo:** Capacitar a más instituciones en el diseño, instalación y gestión de proyectos de biodigestores familiares en Bolivia, para diseminar la tecnología entre las familias rurales.
- **A medio plazo:** Divulgar en todo el territorio nacional la tecnología de biodigestores, de manera que las familias conozcan la tecnología y a partir de esto, bajo sus propios criterios, decidan si quieren incorporarlo a su sistema productivo. Comenzar con los primeros proyectos gestionados por las propias comunidades y asociaciones de productores.
- **A largo plazo:** Democratizar la tecnología de manera que las comunidades, asociaciones de productores, alcaldías, etc. pueden desarrollar y gestionar sus propios proyectos de biodigestores sin asistencia externa ni subvención de la tecnología.

3.3 Apoyo de la GTZ-Energía

Para alcanzar el objetivo propuesto, la GTZ-Energía apoyará en:

- Asesoramiento técnico para cualquier biodigestor o proyecto de biodigestores.
- Capacitación técnica y teórica a grupos de profesionales e instituciones a través de talleres.
- Capacitación técnica a familias, técnicos locales y asociaciones de productores a través de talleres.
- Subsidio del 30% en costo de los materiales de los biodigestores de ejecución.
- Subsidio del 50% en costo de materiales de biodigestores demostrativos. Podrá haber dos biodigestores demostrativos por comunidad donde no haya ya otros biodigestores. Para la instalación de dichos biodigestores se debe realizar un taller comunal reuniendo a los vecinos. Este apoyo solo será efectivo a corto plazo en la etapa de disseminación.
- Apoyo a un comunario con un pequeño sueldo para gestión del proyecto de su comunidad.
- Coordinación y difusión de la información de biodigestores, como medio de contacto entre instituciones interesadas en biogás en Bolivia.

3.4 Estrategias de divulgación

La divulgación de la tecnología ha de llegar, principalmente, a las familias rurales, pero las instituciones, ONGs, alcaldías, universidades, organizaciones son quienes llegan a mayor cantidad de familias, y por tanto debe de priorizarse también la divulgación a estos actores.

Para dar a conocer los biodigestores familiares entre instituciones, alcaldías y comunidades se elaborarán trípticos informativos. Además, a petición de los interesados, se darán charlas, que duran media mañana, explicando la tecnología con videos, la solicitud y gestión de proyectos.

Es importante tener presencia en los medios de comunicación internacionales especializados en desarrollo y energía. Para ello hay que escribir artículos técnicos y sociales sobre las estrategias y avances de implementación, así como sistematizaciones de la metodología.

También hay que aprovechar los medios de comunicación nacional y local, aprovechando eventos como talleres, o la puesta en marcha de biodigestores en comunidades. Las radios locales como medio de convocatoria e información a los comunarios son fundamentales. La realización de videos domésticos, que pueden ser publicados en internet, que muestren la construcción de los biodigestores, o los usos del biogás y del fertilizante, también ayudará en las reuniones con las instituciones interesadas en visualizar el proyecto.

3.5 Estrategias de capacitación

Talleres dirigidos a profesionales del desarrollo rural: A través de talleres intensivos se pretende capacitar a profesionales del desarrollo rural en el diseño, instalación, manejo diario, aplicaciones del fertilizante y biogás, gestión de proyectos y sostenibilidad. Los talleres serán de tres días, el primero

dedicado a diseño de biodigestores, aplicaciones del biogás y fertilizante; el segundo día será práctico con la instalación de un biodigestor en alguna comunidad cercana; y el tercer día será de gestión de proyectos, subsidios existentes, identificación de usuarios, etc. El primer día se invitará a personas con diferentes experiencias en biogás en Bolivia a dar pequeñas charlas. Es importante invitar a instituciones que hayan asistido a anteriores talleres que estén trabajando en proyectos, de manera que expliquen sus experiencias a los asistentes y los motiven.

Talleres comunales: Con el interés de las asociaciones de productores y comunidades se desarrollan talleres comunales locales. En ellos asisten los vecinos de la familia a la que se va a instalar un biodigestor demostrativo. Durante estos talleres se enseña el funcionamiento básico, mantenimiento del biodigestor y se instala un modelo para la región. De esta manera, las familias conocen la tecnología, y normalmente esperan a que el biodigestor comience a funcionar para pedir ellos un nuevo proyecto de ejecución. Todo biodigestor demostrativo debe ir acompañado de un taller comunal.

Publicación de la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares: Se redactará un documento que contenga toda la metodología para el diseño de biodigestores, que aporte modelos para las regiones de altiplano, valle y trópico, contenga un manual de instalación y nuevas ideas a desarrollar en el ámbito de biodigestores familiares. Con este texto se pretende dejar por escrito todo el conocimiento acumulado durante siete años de trabajo en Bolivia y que se convierta en un material de referencia.

3.6 Estrategias de ejecución

Alianzas estratégicas: Existen agrupaciones de productores que reúnen a gran número de familias ya organizadas. Las asociaciones de productores de leche de cada región son las más interesadas en los biodigestores y están compuestas por familias pequeño productoras, con 3 a 10 cabezas de ganado y una producción por familia media de 20 a 70 litros de leche por día. La alianza con estas asociaciones, grandes y pequeñas, refuerza su estructura, aumenta el empoderamiento sobre la tecnología y es un punto muy importante en la sostenibilidad del proyecto. Estas asociaciones serán las que gestionen directamente su proyecto, y la GTZ-Energía aporta el subsidio y asesoramiento técnico durante todo el proceso. Dentro de las alianzas estratégicas deben entrar las empresas lecheras, pues tienen contacto directo con todos los pequeños productores. Además están los municipios donde la actividad lechera es importante. Como medio de financiamiento alternativo habrá que establecer alianzas con instituciones de microcrédito que trabajen directamente con las familias para asegurar una mayor sostenibilidad.

Proyectos con ONGs: Las ONGs que trabajan en el ámbito rural tienen como meta familias que normalmente poseen dos o tres cabezas de ganado y no son lecheras. Las ONGs capacitadas a través de los talleres (o capacitadas anteriormente en la ejecución completa de proyectos de biodigestores) suelen iniciar sus proyectos con biodigestores demostrativos. A partir de entonces comienzan con proyectos más grandes de ejecución. Se apoya a las ONGs con asesoramiento técnico y subsidio del 30% del coste en material para proyectos de ejecución y 50% para proyectos demostrativos.

Proyectos comunales: El trabajo directo con comunidades o pequeñas asociaciones de productores conlleva mayor trabajo, pero asegura conocer de primera mano las impresiones, comentarios, necesidades y formas de trabajo de las familias objetivo del proyecto. Por ello, aunque implique un trabajo

mayor que la colaboración con ONGs o grandes organismos, reporta un conocimiento de la realidad rural imprescindible para el manejo del proyecto global. Los proyectos comunales se basan en la gestión del proyecto por parte de la propia comunidad, tanto en la recolección de dinero de las familias, compra de materiales, fechas de reuniones, y rendición de cuentas.

3.7 Sostenibilidad

La sostenibilidad del proyecto pasa por democratizar la tecnología. Esto es, hacer que el conocimiento de la instalación y mantenimiento de un biodigestor no dependa de técnicos profesionales, y se convierta en conocimiento transmitido de campesino a campesino, de cada familia.

La capacitación de personal técnico especializado y profesional puede ayudar al inicio del proyecto, pero no es sostenible a largo plazo, porque los profesionales capacitados que viven del trabajo con esta tecnología, en cuanto no hay demanda durante unos meses, éstos abandonarían y se dedicarían a otra actividad laboral.

El mayor interés está en capacitar personal local, en las ideas básicas de manejo e instalación, quizás no tan técnicos, pero que puedan instalar un biodigestor. De esta manera ellos no abandonan su trabajo anterior, y harán biodigestores a petición de sus vecinos, cobrando un jornal a la familia beneficiaria. Esto puede

significar un ingreso monetario extra, pero nunca un abandono de sus actividades laborales anteriores.

Para esto, es necesario divulgar “modelos” de biodigestores familiares, de modo que no se necesiten cálculos o diseños particulares, y se disponga de las dimensiones y medidas “comunes” de biodigestores que satisfagan las necesidades de una familia de altiplano, valle y trópico.

A través de estos biodigestores modelo, de la transferencia tecnológica en cuanto a adquisición de materiales, instalación y manejo de un biodigestor se puede lograr la democratización de la tecnología.

Introduciendo el sistema de microcrédito directo entre familias y financiadoras se asegura la sostenibilidad a largo plazo.



Figura 3: La democratización de los biodigestores se produce cuando la transferencia tecnológica sucede de campesino a campesino

3.8 Lecciones aprendidas en divulgación y disseminación

En todo este proceso de desarrollo, divulgación y disseminación de esta tecnología en Bolivia hay varias lecciones aprendidas.

La introducción de los biodigestores en una familia significa que ya no se requiere buscar leña

diariamente para cocinar, tarea normalmente asignada a las mujeres y niños. Por ello es necesario que sea la mujer la que se apropie de la tecnología como nuevo combustible para cocinar. Incluso para hacer las cocinas de biogás se han adaptado las cocinas tradicionales de barro mejorado para que la combustión de biogás sea más eficiente. Esta liberación de la carga de trabajo de las mujeres implica mayor disponibilidad de tiempo para otros usos productivos, capacitación, participación social, etc. Por otro lado, la producción de fertilizante despierta mayor interés en el hombre, ya que suele ocuparse de los cultivos, y por tanto es importante capacitarle convenientemente en su uso, de forma que él también se apropie de la tecnología que le provee de un fertilizante ecológico y natural. Los niños y niñas también es importante tenerlos en cuenta, y hacerlos partícipes como parte de la familia, evitando que en juegos o vandalismo, pudieran dañar el biodigestor.

La estrategia para la divulgación y diseminación de esta tecnología que se ha visto más acertada es a través de biodigestores demostrativos. Esto es, instalar uno o dos biodigestores por región, en una granja municipal si hay interés de las autoridades, en granjas o centros educativos “modelo” que existan o en familias interesadas, de forma que los vecinos vean su funcionamiento, manejo y beneficios. Esta estrategia no es agresiva y se da a conocer una tecnología nueva, de modo que las familias tendrán información y criterios propios para decidir la conveniencia de introducir o no, un biodigestor en sus viviendas y manejo agropecuario. En posteriores visitas a las comunidades se puede hacer ya una diseminación mayor a las familias interesadas.

Una lección aprendida de última hora, es introducir los biodigestores demostrativos en dos familias a la vez en una comunidad, de forma que se genera un apoyo mutuo entre ambas familias en cuanto a trabajo, dudas y transmisión de conocimiento.

La participación de la familia en toda la instalación de un biodigestor ayuda a la apropiación y entendimiento de la tecnología. Se han dado casos en los que la familia ha desmontado y vuelto a montar un biodigestor por considerar otra ubicación más idónea, o para repararlo. El trabajo propio de la familia cavando la zanja que servirá de “cuna”, instalando la línea de biogás desde el biodigestor hasta la cocina es importante de valorar.

Cuando un biodigestor se instala se realiza su primer llenado con gran cantidad de estiércol y agua, hasta que el lodo interior tape las bocas de las tuberías de entrada y salida para asegurar una



Figura 4: Biodigestor recién instalado en altiplano y en proceso de empezar a producir biogás (Pakuani, La Paz, 4200 msnm)

atmósfera anaeróbica. Es importante hacer un seguimiento posterior, puesto que el biodigestor tardará tantos días como tiempo de retención se haya considerado para entrar en plena producción de biogás y fertilizante. En el caso del altiplano esto puede suponer dos meses cargando diariamente un biodigestor que aun no da los productos esperados, y por tanto es necesario acompañar y apoyar a la familia en este proceso para que no se sienta que el trabajo es en vano.

Es importante aprovechar las estructuras sociales propias de cada lugar, como por ejemplo la asociación de productores de leche local u otros tipos de asociaciones. De esta manera ya existe una forma de representación, de comunicación, convocatoria y de control interno que no es necesario generar con cada nuevo proyecto.

En caso de existir subvenciones monetarias para adquirir los materiales, ya sea por parte de ONGs, municipios o cualquier otro tipo de ayuda, nunca ha de ser total y -por tanto- hay que hacer partícipe a la familia en los costos. Es importante que la familia no solo ponga parte de la mano de obra para la construcción de la “cuna”, sino que además aporte dinero. La cantidad puede ser variable de acuerdo al contexto social, pero es recomendable que no sea inferior al 50% del presupuesto en materiales del biodigestor. De esta forma las familias que decidan instalar un biodigestor, lo harán en un grado muy importante de apropiación de la tecnología, además que obliga a la institución o promotor a tener una responsabilidad y dar garantía en los materiales empleados, y en el funcionamiento del sistema. De otro modo, tanto la apropiación de la tecnología por parte de la familia así como el compromiso del buen hacer del instalador, pueden ser menores.

4. Guía de diseño de biodigestores familiares

Este documento pretende dar a conocer un método sencillo para diseñar un biodigestor familiar de bajo costo. Muchos son los documentos consultados para realizar esta guía y se ha preferido añadir al final una bibliografía de recomendada lectura para aquellos que quieran profundizar en el tema. Otros datos o metodologías simplificadas son causa de la experiencia acumulada en campo y algunas veces no se dispone de corroboración de resultados de laboratorio.

Esta guía de diseño presenta inicialmente los conceptos que se deben considerar en el diseño de un biodigestor. Inicialmente presenta parámetros que determinan el diseño, además se aporta un método simplificado de estimación de biogás diario disponible. Por el carácter popular de esta guía se ha preferido explicar algunos términos de manera más divulgativa y menos científica.

Hasta este punto, se tendrá la capacidad de diseñar el biodigestor en cuanto volúmenes, y es entonces cuando es necesario determinar las dimensiones de longitud, diámetro y dimensiones de la fosa donde se albergará el biodigestor.

Tras la explicación de los conceptos se presentan tres formas de cálculo a modo de ejemplo, que se diferencian en el objetivo del diseño del biodigestor: criterios de disponibilidad de estiércol, criterios de necesidades de combustible y un biodigestor para tratamiento de aguas negras provenientes de una letrina.

4.1 Conceptos en el diseño de un biodigestor familiar

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. La temperatura marcará la actividad de las bacterias que digieren el estiércol, y cuanto menor temperatura, menor actividad tendrán éstas, y por tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor. De esta forma la temperatura marca el tiempo de retención.

Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor.

Una cualidad de esta tecnología es que es adaptable a muchas situaciones, y su diseño puede considerar diferentes criterios:

- Criterios de necesidad de combustible
- Criterios de necesidades medioambientales (cuando se desea tratar todo el estiércol generado)

- Criterios de un fertilizante natural
- Criterios de límite de estiércol disponible

Según cuál sea el objetivo del biodigestor; proveer de combustible, generar un buen fertilizante o depurar residuos orgánicos, unos parámetros u otros serán los que definan la metodología de cálculo del biodigestor.

Es importante añadir en este punto que un biodigestor también puede digerir las aguas negras producidas en una letrina, pero que para ello se deberán considerar factores extra, como son el uso limitado del fertilizante y el tamaño del biodigestor.

4.1.1 Digestión anaerobia

El estiércol fresco contiene bacterias que continúan digiriéndolo y producen metano, dióxido de carbono y otros gases. Si esta digestión se hace en ausencia de aire (digestión anaerobia) se produce biogás, que es uno de los intereses de un biodigestor. Realmente hay una producción en cadena de diferentes tipos de bacterias. Unas inicialmente producen una hidrólisis del estiércol generando ácidos orgánicos. Otro tipo de bacterias digieren estos ácidos orgánicos a través de una deshidrogenación y acetogénesis dando como resultado ácido acético e hidrógeno. Y finalmente otras bacterias, llamadas metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, que es el gas más importante del biogás y el que permite la combustión.

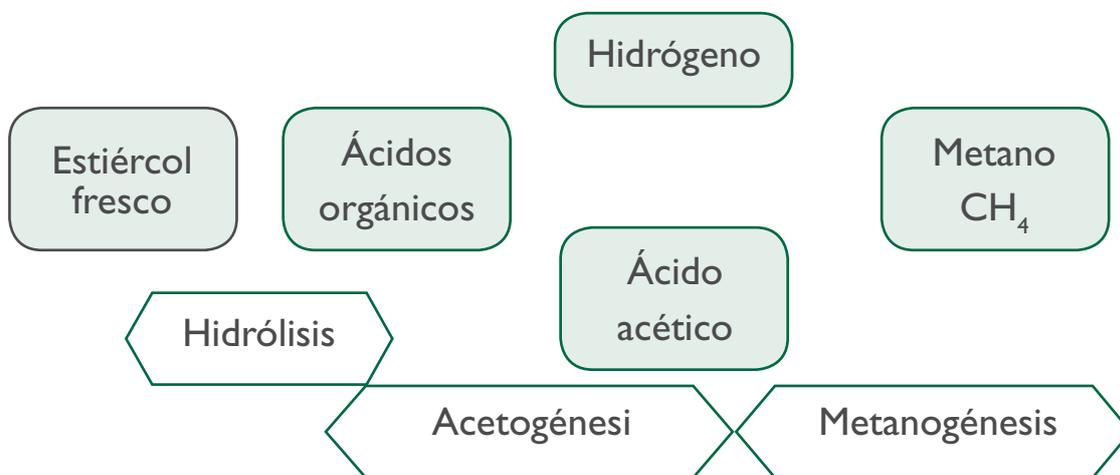


Figura 5: Proceso biológico que sucede en el interior de un biodigestor.

4.1.2 Temperatura y tiempo de retención

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo

de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción se depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias quedan 'dormidas' y ya no producen biogás.

Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

Tabla 4.1: Tiempo de retención según temperatura

| Región característica | Temperatura (°C) | Tiempo de retención (días) |
|-----------------------|------------------|----------------------------|
| Trópico | 30 | 20 |
| Valle | 20 | 30 |
| Altiplano | 10 | 60 |

4.1.3 Estiércol disponible

La materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de chanco y el humano, pero el fertilizante que producen es muy ácido, además de que en el caso humano hay que tener otras consideraciones como se verá en el correspondiente apartado. El estiércol más equilibrado es el de vaca, además que por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger.

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

En la siguiente tabla se muestra la producción de estiércol fresco diario para diferentes animales, por cada 100 kilogramos de peso del animal.

Tabla 4.2: Producción de estiércol fresco diario

| Ganado | Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal |
|---------------|---|
| Cerdo | 4 |
| Bovino | 8 |
| Caprino | 4 |
| Conejos | 3 |
| Equino | 7 |
| Humano adulto | 0,4 kg por adulto |
| Humano niño | 0,2 kg por niño |

Por tanto una vaca de 300 kg de peso produce al día 21kg de estiércol fresco, que en caso de ser pastoreada sólo se podrá recoger el 25% de ese estiércol, por tanto, 5.25 kg. Así como cinco chanchos de 70 kg cada uno producirá 14 kg de estiércol diario.

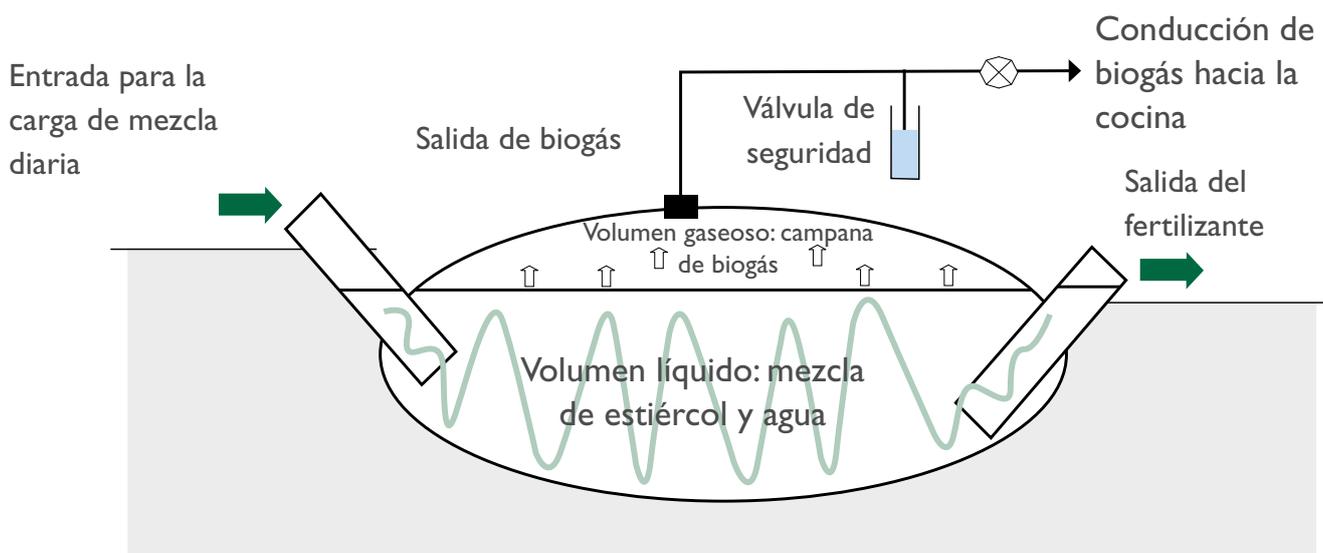


Figura 6: Esquema básico de un biodigestor y del inicio de la conducción de biogás hacia la cocina.

4.1.4 Carga de mezcla diaria de entrada

Todos los días hay que cargar el biodigestor con una carga de estiércol mezclada 1:4 con agua. De esta manera, una parte es de estiércol y cuatro de agua. A esto se le llama mezcla de carga diaria (estiércol más agua). En artículos y bibliografía anterior se recomendaba en todos los casos mezclas de 1:4 para biodigestores tubulares, pero en el caso de estiércol de ganado bovino, una mezcla de 1:3 es suficiente como se ha visto experimentalmente. En biodigestores tipo chino la mezcla se realiza 1:1, pero en biodigestores tubulares conviene diluir mucho más el estiércol de forma que no se formen 'natas' en la superficie. Además, una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor realmente sea de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida en su interior.

Biodigestores tubulares que fueron cargados con relaciones de 1:2 de estiércol y agua, tuvieron que ser desatascados a los pocos meses, por acumularse exceso de materia sólida en su interior.

El suero de la leche de la vaca está dando muy buenos resultados en la producción de biogás, y si es posible, se puede sustituir parte del agua a introducir diariamente por los mismos litros de suero de vaca.

4.1.5 Volumen total de biodigestor

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa.

El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido.

$$V_T = V_G + V_L$$

Y por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$V_L = V_T \times 0.75$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$V_G = V_T \times 0.25$$

Y el volumen gaseoso será igual a una tercera parte del volumen líquido:

$$V_G = V_L \div 3$$

4.1.6 Volumen líquido

Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias, es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado (según la temperatura del lugar). Ya que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen líquido será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria. De esta manera, si imaginamos el biodigestor vacío inicialmente y comenzamos a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado en llenarse. Y así, “tiempo de retención + 1 día”, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día ya digerida.

El volumen líquido de un biodigestor será el resultado de multiplicar la mezcla diaria de carga por el tiempo de retención.

4.1.7 Volumen gaseoso

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia (en ausencia de oxígeno) se va a producir biogás, y éste se acumulará en la parte superior. Al ser el biodigestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y darle forma al biodigestor.

El volumen gaseoso equivale a un tercio del volumen líquido.

4.1.8 Producción de biogás

La mezcla de estiércol con agua en el interior del biodigestor, en ausencia de aire, producirá biogás. Esta producción no es constante, y es un proceso que dura, más o menos, el tiempo de retención estimado según la temperatura de trabajo. De esta forma, un kilo de estiércol irá produciendo biogás de poco a poco a lo largo del tiempo de retención al que esté sometido.

Existen diferentes métodos para estimar la producción de biogás de un biodigestor según su carga diaria de estiércol, pero aquí se presenta lo que se denomina un “número mágico” para realizar este cálculo de forma sencilla.

La estimación de este “número mágico” se realiza a través de los conceptos de “sólidos totales” y “sólidos volátiles” que se desarrollan en el anexo. En la estimación se han considerado valores medios y por tanto el empleo de este “número mágico” sirve para tener una idea aproximada del volumen de biogás generado por día siempre que se cumplan los tiempos de retención adecuados a cada temperatura de trabajo.

Tabla 4.3: Producción de biogás

| Ganado | Número mágico (litros de biogás producidos por día por kilo de estiércol fresco cargado diariamente) |
|--------|---|
| Cerdo | 51 |
| Bovino | 35.3 |

La producción de biogás diario será el resultado de multiplicar la carga de estiércol diaria por el “número mágico”.

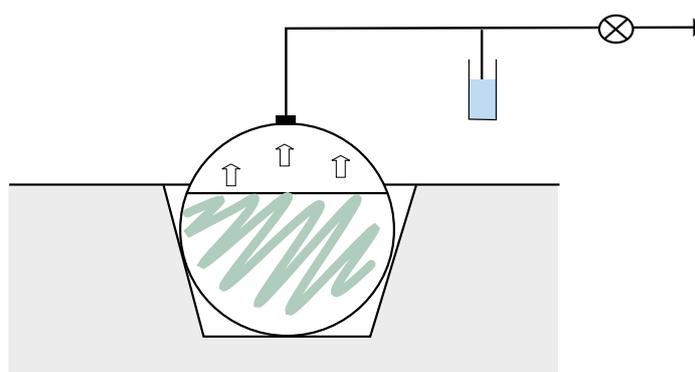


Figura 7: Corte transversal de un biodigestor, donde se ve que la zanja donde se ubicará tiene forma de chafalán (paredes inclinadas) y éstas soportan la parte del volumen líquido, quedando la campana de biogás arriba. Dependiendo del ancho de rollo (del diámetro de la manga) la zanja tendrá unas dimensiones diferentes.

4.1.9 Consumo de biogás

El biogás producido se emplea normalmente como sustituto de la leña, bosta seca o gas de garrafa, para cocinar. El poder calorífico del biogás es menor al del butano o propano e implica que se tarda en cocer más tiempo los alimentos que cuando se hace con gas natural o de garrafa. El consumo de una cocina doméstica normal se puede estimar en 130-170 litros por hora.

Tabla 4.4: Equivalencias energéticas del biogás

| 1000 litros(1 m ³) de biogás equivale a: | |
|--|---------------------|
| Madera | 1.3 kg |
| Bosta seca | 1.2 kg |
| Alcohol | 1.1 litros |
| Gasolina | 0.75 litros |
| Gas-oil | 0.65 litros |
| Gas natural | 0.76 m ³ |
| Carbón | 0.7 kg |
| Electricidad | 2.2 Kw/h |

El biogás también se puede emplear para iluminación en lámparas de gas comerciales. El consumo de estas lámparas varía según el fabricante pero se puede considerar un consumo de 90 a 130 litros por hora.

Cuando se produce gran cantidad de biogás éste se puede emplear en calefacción (de chiqueros y cría de pollos) e incluso conectarlo a un motor para su funcionamiento.

4.1.10 Producción de fertilizante

La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás. Pero por otro lado quedará un líquido ya digerido, que ha producido todo el biogás que podía, y que se convierte en un excelente fertilizante. A este fertilizante se le suele llamar de forma general biol. Es cierto que en algunos documentos diferencian entre su parte más líquida y su parte sólida, llamando a la primera biol y a la segunda biosol.

El fertilizante producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y entorno a un 85% de materia orgánica con un PH de 7.5.

Para producir un mejor fertilizante es interesante aumentar los tiempos de retención, de manera que el lodo se descomponga más, y sea de mayor calidad



Figura 8: Cocina artesanal de biogás hecha con tubería de hierro de ½” y la estructura en barro. Consume, una media, 140 litros por hora.

y más fácil de asimilar por las plantas. El fertilizante que sale de un biodigestor con los tiempos de retención expresados en la Tabla 3.1 es muy bueno, pero si aumentamos estos tiempos de retención en un 25% es excelente.

Tabla 4.5: Tiempo de retención según temperatura para mejor fertilizante

| Región característica | Temperatura (°C) | Tiempo de retención (días) |
|-----------------------|------------------|----------------------------|
| Trópico | 30 | 25 |
| Valle | 20 | 37 |
| Altiplano | 10 | 75 |

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



Figura 9: Salida del biodigestor por donde se derrama el biol.

4.1.1 Aplicaciones del fertilizante

Existen diferentes experiencias en el uso del biol producido en un biodigestor y aquí se presentarán tres de ellas básicas explicadas de acuerdo a los tiempos de los cultivos.

- Inicialmente, cuando el terreno se ara, se puede usar el fertilizante recién salido del biodigestor para regar cada surco.
- El día antes de sembrar, se pueden introducir las semillas o grano en una mezcla de 1 a 1 de fertilizante con agua por un tiempo de 4 o 5 horas.
- Una vez en crecimiento la planta, se puede filtrar el fertilizante y fumigar (uso como fertilizante foliar) las plantas con una mezcla de una parte de fertilizante y 4 de agua. Funciona muy bien fumigar tras una helada, así como cuando ya comienza el fruto a aparecer, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta.

Es muy importante considerar que si el biodigestor está conectado a una letrina, el uso del fertilizante foliar se restringe a frutales, cultivos cuyo fruto sea subterráneo (papas, cebolla, zanahoria, etc.) y en

cultivos cuyo fruto esté a más de 50 cm del suelo, fumigando en la parte inferior de la planta y nunca sobre el fruto. Esto es debido a que en la digestión anaerobia que se sucede en el biodigestor de las heces humanas mueren de un 80 a 95% de los coliformes humanos. Pero aún resta una mínima cantidad de coliformes que pudiera afectar a la salud humana si es que alcanzan al fruto que más tarde servirá de alimento.

4.1.12 Consideraciones en caso de unir una letrina al biodigestor

Se pueden tratar las heces humanas a través de un biodigestor, pero se requiere un trabajo diferente. Las heces humanas contienen coliformes, que de ser ingeridos de nuevo por la población, pueden afectar a la salud humana.

Es importante que al biodigestor sólo llegue el desagüe de la letrina y no el agua del lavamanos o de la ducha, porque contiene jabones y detergentes que matarán a las bacterias metanogénicas del interior del biodigestor. La higiene de los baños debe ser con agua, y solo una o dos veces a la semana con detergentes.

Hay que considerar que la mezcla de agua en el caso de las letrinas suele ser una descarga de 5 litros para arrastrar 400 gramos de heces de un humano adulto. Si no se considera la conexión de la letrina al biodigestor en el diseño, estaremos aumentando fuertemente la mezcla de carga diaria, y esto conducirá a un menor tiempo de retención. Esto es debido a que si se ha diseñado el biodigestor para una carga de mezcla diaria según el estiércol disponible del ganado y añadimos a esa carga diaria todo lo que venga de la letrina, estará entrando mayor cantidad de lo previsto y por tanto el tiempo de retención será menor, implicando:

- Una menor producción de biogás por no darle tiempo a las bacterias a realizar su trabajo.
- Una menor descomposición de las heces humanas aumentando por tanto su contenido en coliformes dañinos para la salud humana.

Se recomienda reducir la descarga de agua en la letrina, introduciendo una botella de refresco de 2 litros en el depósito, para que de esta forma sólo descargue 3 litros. Si consideramos el aumento en la carga de mezcla diaria en un biodigestor diseñado bajo la metodología anterior (sumando el estiércol humano más el de los animales), hay que considerar el uso restringido de todo el fertilizante, tal y como se comenta en el apartado 4.1.11, pues aun contendrá una mínima cantidad de coliformes.

Si se desea tratar convenientemente las aguas negras que salen de la letrina, se deberá aumentar el tiempo de retención del biodigestor al doble y aún así será necesario sufrir las limitaciones en el uso del fertilizante. Esto tiene dos consecuencias:

- Un biodigestor mixto (tratamiento de estiércol y aguas negras) deberá tener un tamaño mucho mayor debido al incremento en el tiempo de retención.
- Todo el fertilizante producido estará sujeto a restricciones de uso (tal y como se dice en el apartado 4.1.11) aún siendo sólo el 10% del fertilizante producido proveniente del tratamiento de las aguas negras.

Por tanto, la mejor solución es hacer dos biodigestores, uno adecuado para estiércol animal, que producirá la mayor cantidad de biogás y su fertilizante no está sujeto a restricciones, y otro para tratar sólo las aguas negras, con una baja producción de biogás (por la poca materia entrante) y con

uso restringido del fertilizante. Este fertilizante si no se quiere usar, se puede echar a los ríos pues ya ha sido convenientemente tratado.

Se añade un ejemplo al final de este capítulo para el diseño de un biodigestor para tratar las aguas negras producidas por una familia en valle alto, así como las soluciones para familias tipo en el capítulo 5.

4.2 Conceptos en el dimensionado de un biodigestor familiar

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

Hay que recordar que hasta ahora se ha hablado en litros para los volúmenes y que a partir de aquí estos volúmenes se trabajan en metros cúbicos, es decir 1.000 litros equivalen a un metro cúbico (1000 litros = 1 m³).

4.2.1 Ancho de rollo y radio de la manga

El polietileno tubular se vende en rollos de 50 metros, con un ancho de rollo que varía normalmente entre 1, 1.25, 1.50, 1.75 y 2 metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico.



Figura 10: Desenrollando el rollo de polietileno tubular. Un rollo de polietileno tubular suele ser de 50 metros, y el ancho del rollo (que es la mitad de la circunferencia de la manga) es variable según lo que se compre.

Normalmente este plástico se usa para carpas solares, y de igual manera se vende en su forma tubular. Para su uso se corta en uno de sus pliegues y se abre la manga de plástico para convertirla en una sábana del doble de ancho que el ancho de rollo.

Para la construcción de biodigestores tubulares, es la forma del plástico, la que permite hacer una cámara hermética si es que amarramos ambos extremos de la manga.

El ancho de rollo determina el diámetro y radio de nuestro biodigestor. Según el ancho de los rollos más comunes en el mercado encontramos:

Tabla 4.6: Parámetros según el ancho de rollo

| Ancho de rollo (m) | Perímetro de la circunferencia (m) | Radio (m) | Diámetro (m) |
|--------------------|------------------------------------|-----------|--------------|
| 1 | 2 | 0.32 | 0.64 |
| 1.25 | 2.5 | 0.40 | 0.80 |
| 1.50 | 3 | 0.48 | 0.96 |
| 1.75 | 3.5 | 0.56 | 1.12 |
| 2 | 4 | 0.64 | 1.28 |

4.2.2 Volumen de una manga, sección eficaz y longitud

El biodigestor es una manga de plástico amarrada por ambos extremos a una entrada y una salida. El volumen total de este manga equivale al volumen de un cilindro (en metros cúbicos) que se calcula multiplicando $\pi \times r^2 \times L$, siendo $\pi=3.1416$, r el radio del tubo (en metros) y L la longitud del biodigestor (en metros).

Lo normal es primero obtener los resultados de $\pi \times r^2$ (sección eficaz) para cada uno de los anchos de rollos disponibles, para luego con estos valores, estimar la longitud necesaria para alcanzar el volumen total deseado.

$$V_{cilindro} = \pi \times r^2 \times L$$

$$Sección\ eficaz_{cilindro} = \pi \times r^2$$

$$\pi = 3.1416$$

$$r = \text{radio del tubo}$$

$$L = \text{longitud del biodigestor}$$

Tabla 4.7: Sección eficaz según el ancho de rollo

| Ancho de rollo (m) | Sección eficaz (pi x r ²) (m ²) |
|--------------------|---|
| 1 | 0.32 |
| 1.25 | 0.50 |
| 1.50 | 0.72 |
| 1.75 | 0.97 |
| 2 | 1.27 |

Conociendo el volumen total del biodigestor y las secciones eficaces de los plásticos disponibles (según su ancho de rollo), es fácil determinar la longitud necesaria. Si el volumen del biodigestor es $\pi \times r^2 \times L$, y conocemos todos los parámetros excepto la longitud, despejando de la anterior fórmula se obtiene: $L = V_t / (\pi \times r^2)$. De esta manera se genera un cuadro en el que se ponen los resultados de la longitud para cada ancho de rollo.

$$L = \frac{V_r}{(\pi \times r^2)}$$

Tabla 4.8: Longitud del biodigestor según el ancho de rollo

| Ancho de rollo (m) | Sección eficaz (pi x r ²) (m ²) | Longitud del biodigestor (m) |
|--------------------|---|------------------------------|
| 1 | 0.32 | $V_t/0.32$ |
| 1.25 | 0.50 | $V_t/0.5$ |
| 1.50 | 0.72 | $V_t/0.72$ |
| 1.75 | 0.97 | $V_t/0.97$ |
| 2 | 1.27 | $V_t/1.27$ |

4.2.3 Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

Según lo anterior, se tendrán diferentes posibilidades de longitudes y anchos de rollo para alcanzar el volumen total deseado. Los anchos de rollo más grandes exigirán menor longitud para alcanzar el volumen deseado. No conviene biodigestores demasiado cortos ni largos y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7.

Esto significa que dividiendo la longitud estimada entre el diámetro de la manga, habrá que seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a una relación de 7. Esta relación es flexible en un rango de 5-10, siendo la mejor 7.

$$\frac{L}{d} = \text{entre 5 a 10 (óptimo de 7)}$$

Tabla 4.9: Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

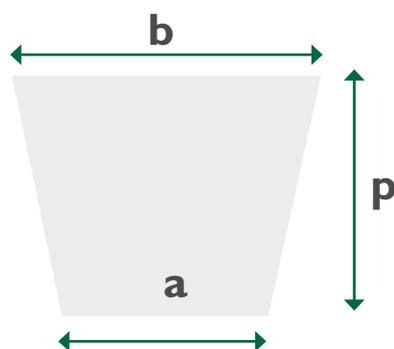
| Ancho de rollo (m) | Longitud del biodigestor (m) | Diámetro del biodigestor (m) | L/d (óptimo de 7 en un rango de 5-10) |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | $V_t/0.32$ | 0.64 | L/d |
| 1.25 | $V_t/0.5$ | 0.80 | L/d |
| 1.50 | $V_t/0.72$ | 0.96 | L/d |
| 1.75 | $V_t/0.97$ | 1.12 | L/d |
| 2 | $V_t/1.27$ | 1.28 | L/d |

De esta manera, calculando la sección eficaz para cada ancho de rollo disponible en el mercado y estimando a partir de esta y del volumen deseado las diferentes longitudes requeridas, se elige el mejor, dimensionado según el criterio de una relación entre la longitud y el radio de 7.

4.2.4 Dimensiones de la zanja del biodigestor

El diseño final del biodigestor requiere conocer las dimensiones de la zanja donde se acomodará el plástico tubular. La longitud de la zanja queda determinada por la longitud del biodigestor y la profundidad y ancho de la misma dependerán del ancho de rollo empleado en la construcción del biodigestor.

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



| Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR) | | | | | |
|--|-----|------|-----|------|-----|
| AR (m) | 2 | 1.75 | 1.5 | 1.25 | 1 |
| a(m) | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 |
| b(m) | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |
| p(m) | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 |

Hay que considerar que al alojar el biodigestor en la zanja, las paredes de ésta sustentarán toda la presión del volumen líquido del biodigestor. La cúpula de biogás estará en la parte superior y ocupará un 25% del volumen total.

Si se construye una zanja sin considerar el ancho empleado puede suceder que la cúpula de biogás sea demasiado pequeña o incluso grande. En caso de que la cúpula ocupe más de un 25% del volumen, se estará restando volumen a la fase líquida y por tanto reduciendo el tiempo de retención.

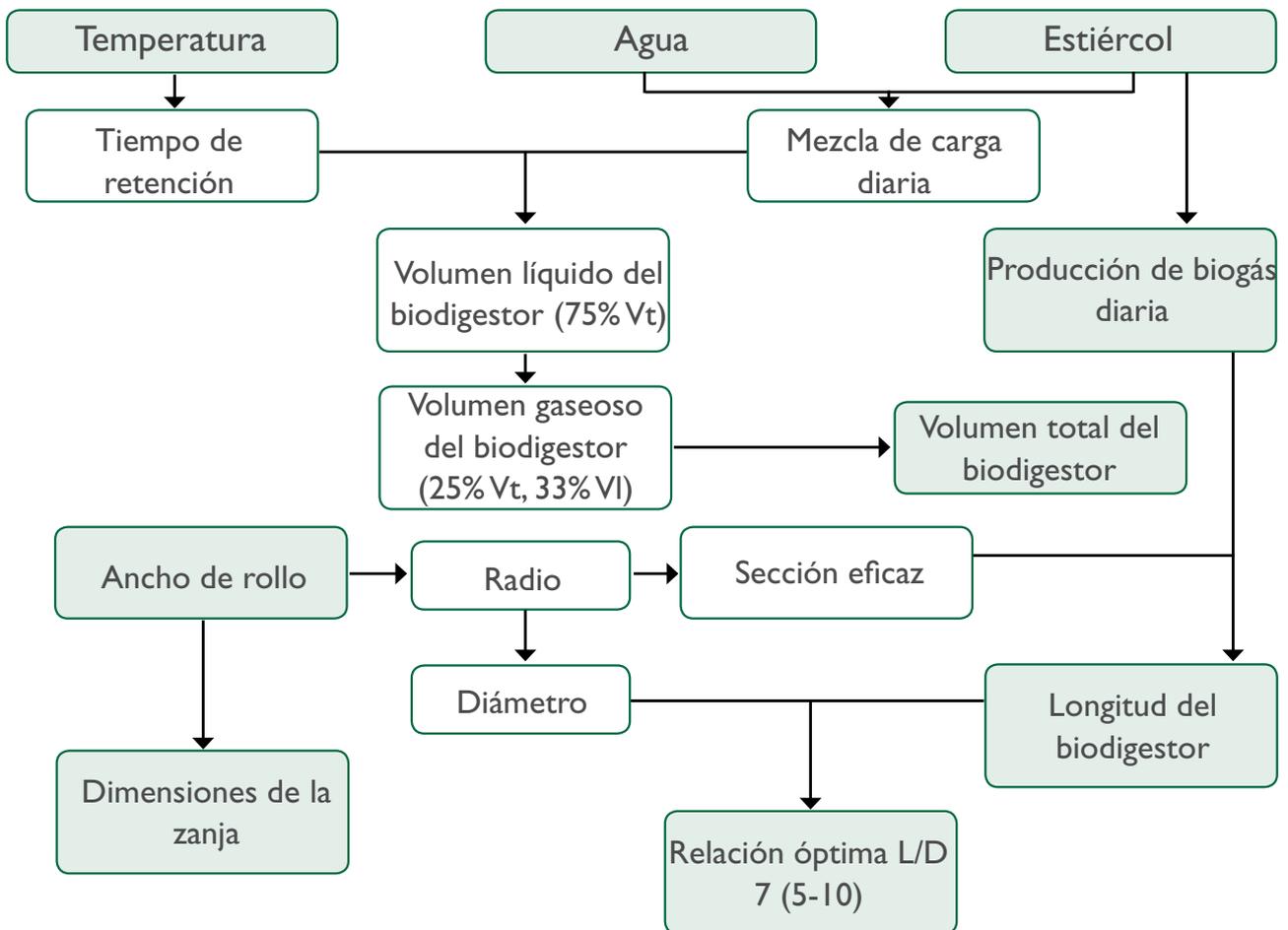
4.2.5 Equilibrio hidráulico

El biodigestor tubular es de flujo continuo, y por tanto no es necesario vaciarlo normalmente a lo largo de su vida útil. Se produce un equilibrio hidráulico por el que cada día al realizar la mezcla de carga por la

entrada, desplazará el lodo interior, y rebosará por el otro extremo, la salida, la misma cantidad pero del material ya digerido.

Por tanto, el rebalse o rebose del lodo interior, es definido por la altura de la boca del tubo de salida. Este nivel corresponderá, por tanto con la profundidad de la zanja, para que de esta manera, el lodo en el interior del biodigestor, alcance dicha altura, y el volumen del líquido estimado corresponda con la realidad. Si la boca de salida está por debajo de la profundidad estimada, estaremos reduciendo la altura del lodo en el interior (y por tanto reduciendo el volumen líquido y el tiempo de retención). Y si por el contrario la boca de salida se encuentra por encima de la profundidad estimada, estaremos aumentando el volumen líquido, e impidiendo la formación de la cúpula superior que acumula gas.

4.3 Esquema de metodología de diseño



4.4 Ejemplo de diseño de un biodigestor

4.4.1 Diseño de un biodigestor según disponibilidad de estiércol

Un ejemplo típico en el diseño de biodigestores es estimar el estiércol disponible para ser recogido por la familia. Es importante indicar que la recogida de estiércol nunca debe suponer mayor cantidad de trabajo, del que se realizaba anteriormente, para disponer de combustible (recogiendo leña, por ejemplo). Por ello, el estiércol fresco tiene que estar cerca a la casa.

Supongamos un caso en que se dispone de 5 vacas que se pastorean diariamente, y son tabuladas a la noche. Según la tabla 4.2, y suponiendo un peso por cada vaca de 325 kg, tenemos que las 5 vacas producen diariamente 130 kg de estiércol. Al ser encerradas en corral sólo en la noche, la cantidad de estiércol que se puede recoger es un 25% del total producido a lo largo del día, de manera que se dispone de 32.5 kg de estiércol para ingresar al biodigestor.

Por ser ganado vacuno, podemos realizar una mezcla del estiércol de 1:3 con agua para la carga diaria, de forma que la mezcla de carga diaria sería 130 litros.

Si suponemos que estamos en una región de valle alto, con una temperatura media de unos 15 grados, según la tabla 3.1 podemos asignar un tiempo de retención de 45 días.

Conociendo la carga diaria y el tiempo de retención, el volumen líquido del biodigestor será:

$$V_L = \text{Carga diaria} \cdot \text{tiempo retención}$$

De esta forma resulta que el volumen líquido sería 5.850 litros.

Asignando una campana de gas que suponga el 25% del Volumen Total, lo que significa un tercio del Volumen Líquido, se tiene:

$$V_G = V_L/3$$

Resulta un volumen gaseoso de 1.950 litros.

Finalmente el volumen total será por tanto, la suma de V_L y V_g , 7.800 litros o 7.8 m³.

$$V_T = V_G + V_L = 7800 \text{ litros} = 7.8 \text{ m}^3$$

La producción de biogás diario para 32.5 kilos de carga de estiércol será según la Tabla 4.3:

$$\text{Producción de Biogás día (litros)} = \text{carga de estiércol (kg)} \times 35.3$$

Así se estima que se producirán 1.147 litros de biogás al día. Esto significa que si el biogás se emplea en una cocina doméstica, se podrá cocinar por más de siete horas cada día.

Para el dimensionado del biodigestor se construye una tabla con todas las posibilidades de anchos de rollos.

| Dimensionado de un biodigestor de volumen total 5.850 m ³ (5.858 litros) Zona de valle de 15 °C de temperatura media Carga de estiércol diaria: 32.5 kilos Mezcla de carga diaria: 130 litros Producción de biogás diario: 1.147 litros | | | | | |
|--|-----------|--------------|--|--|------------------------------|
| Ancho de rollo (m) | Radio (m) | Diámetro (m) | Sección eficaz (π x r ²) (m ²) | Longitud del biodigestor Vt/secc. Eficaz (m) | Relación Longitud / diámetro |
| 1 | 0.32 | 0.64 | 0.32 | 24.5 | 38.5 |
| 1.25 | 0.40 | 0.80 | 0.50 | 15.7 | 19.7 |
| 1.50 | 0.48 | 0.96 | 0.72 | 10.9 | 11.4 |
| 1.75 | 0.56 | 1.12 | 0.97 | 8 | 7.18 |
| 2 | 0.64 | 1.28 | 1.27 | 6.1 | 4.8 |

En la tabla realizada, sólo una de las dimensiones cumple una relación entre longitud y diámetro del biodigestor, que comprende entre 5 y 10, que es para el caso de un ancho de rollo de 1.75 m. Además en este caso la relación es óptima, ya que es muy cercana a 7.

Conociendo, por tanto, el ancho de rollo que se va a emplear, y la longitud requerida de biodigestor, ya se pueden conocer las dimensiones de zanja donde se pondrá el biodigestor. Éstas serán:

| Ancho de rollo de 1.75 m | | | |
|--------------------------|--------|--------|-----|
| A | B | P | L |
| 0.60 m | 0.80 m | 0.90 m | 8 m |

4.4.2 Diseño de un biodigestor según necesidades de combustible

Otro caso corriente es diseñar un biodigestor para que cubra necesidades de combustible. Supongamos el caso de una familia pequeña que vive en el altiplano, que tiene una yunta de bueyes y que cocina normalmente por dos horas y media cada día con leña. Si se sustituye la leña por biogás, el tiempo de uso de la cocina será mayor, porque el biogás tiene menor poder calorífico.

Por tanto se estima que habrá que diseñar un biodigestor capaz de producir biogás para cocinar por tres horas cada día.

Considerando un consumo de 140 litros por hora, tres horas de biogás implican la necesidad de un biodigestor que produzca diariamente 420 litros de biogás. Haciendo uso del “número mágico” de la Tabla 4.3, se obtiene la cantidad de estiércol que se mezclará con agua para cada día producir esos 420 litros de biogás.

$$\text{Carga de estiércol} = 420 \text{ litros} / 35.3$$

Se obtiene que son necesarios 11.83 kg de estiércol fresco al día. Redondeando supondremos una carga de 12 kg.

Por ser ganado vacuno se realiza una mezcla 1:3 de estiércol con el agua, por lo que todos los días se mezclarán 12 kg de estiércol fresco con 36 litros de agua, dando un total de carga de mezcla diaria de 48 litros. Al estar la familia en el altiplano el tiempo de retención será de 60 días y conociendo la carga de mezcla diaria se obtiene el volumen líquido:

$$V_L = \text{tiempo de retención} \times 48 \text{ litros} = 2880 \text{ litros}$$

El volumen líquido serán 2.880 litros (2.880 m³) que supone tres cuartas partes del volumen total, ya que una parte será para la campana de gas. De esta forma, a la campana de gas se le asigna un volumen de un tercio del volumen líquido resultando en 960 litros de volumen. El volumen total será por tanto de 3.840 litros (3.840 m³).

Para las dimensiones del biodigestor de 3.840 m³, se realiza una tabla en la que aparecen los anchos de rollo de polietileno tubular disponible en el mercado.

| Dimensionado de un biodigestor de volumen total 3.840 m ³ (3.840 litros) Zona de Altiplano de 10 °C de temperatura media Carga de estiércol diaria: 12 kilos Mezcla de carga diaria: 48 litros Producción de biogás diario: 423 litros | | | | | |
|---|-----------|--------------|---|--|------------------------------|
| Ancho de rollo (m) | Radio (m) | Diámetro (m) | Sección eficaz (pi x r ²) (m ²) | Longitud del biodigestor (Vt/secc. Eficaz) (m) | Relación Longitud / diámetro |
| 1 | 0.32 | 0.64 | 0.32 | 12 | 18.9 |
| 1.25 | 0.40 | 0.80 | 0.50 | 7.7 | 9.7 |
| 1.50 | 0.48 | 0.96 | 0.72 | 5.4 | 5.6 |
| 1.75 | 0.56 | 1.12 | 0.97 | 3.9 | 3.5 |
| 2 | 0.64 | 1.28 | 1.27 | 3 | 2.4 |

En la tabla se observa cómo existen dos anchos de rollos con los que puede trabajar, ya que tanto el ancho de rollo de 1.25m como el de 1.5 dan una relación entre la longitud del biodigestor y el diámetro entre 5 y 10. En este caso, ambos valores son muy extremos, 5.6 y 9.7 y la decisión de cual escoger dependerá, principalmente, de dos factores: costo de cada tipo de plástico y disponibilidad de espacio en el terreno familiar.

Las dimensiones de la zanja para el caso de escoger el ancho de rollo de 1.5 m para un biodigestor de 5.4 metros de largo serán:

| Ancho de rollo de 1.5 m | | | |
|-------------------------|--------|--------|-------|
| A | B | P | L |
| 0.50 m | 0.70 m | 0.80 m | 5.4 m |

En el caso de escoger un ancho de rollo de 1.25 m el biodigestor tendría una longitud de 7.7 metros y las dimensiones de la zanja serían:

| Ancho de rollo de 1.25 m | | | |
|--------------------------|--------|--------|-------|
| A | B | P | L |
| 0.40 m | 0.60 m | 0.70 m | 7.7 m |

4.4.3 Diseño de un biodigestor conectado únicamente a una letrina

En el caso de valle alto, una familia de dos adultos y cuatro niños, producen 1.6 kg de heces promedio al día. Si se ha reducido la cantidad de agua en la descarga de la letrina a tres litros, significa que los seis miembros de la familia descargan 18 litros de agua, que hacen un total de 19.6 litros que se introducen al biodigestor cada día. En un tiempo de retención de 100 días, por ejemplo, se obtiene un volumen líquido de 1.960 litros. Si el volumen líquido es tres partes de cuatro del volumen total, éste será 2.607 litros, o 2.607 metros cúbicos. Para un ancho de rollo de 1.25 m, se necesita un biodigestor de 6.5 m de longitud para envolver este volumen total. Este biodigestor produciría, si consideramos el número de mágico de producción de biogás para los chanchos, que es el más parecido al humano, unos 80 litros de biogás al día.

Anexo: Estimación del biogás diario producido

ST: Sólidos totales (Kg/m³)

De forma general, el estiércol fresco tiene entorno a un 17% de sólidos totales. El rango puede variar de 13 a 20 %. Los sólidos totales representan el peso del estiércol una vez seco y por tanto es la carga real de materia sólida que se estará introduciendo en el biodigestor. Para calcular los sólidos totales que introducimos diariamente en un biodigestor, basta con multiplicar la carga de estiércol por 0.17 y se mide en kilogramos.

Si se desea estimar la proporción de sólidos totales contenidos en la carga diaria (estiércol más agua) del biodigestor se deberá considerar la mezcla realizada con agua. De esta manera:

| Material | Sólidos Totales (%) |
|------------------|---------------------|
| Estiércol fresco | 17 |
| Mezcla 1:4 | 3.4 |
| Mezcla 1:3 | 4.25 |

SV: Sólidos volátiles (Kg/m³ día)

Los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales del estiércol que están sujetos a pasar a fase gaseosa. Su valor corresponde aproximadamente -y de forma general- al 77% del sólido total introducido por día.

PB: Producción de biogás (m³/KgSV m³ día)

La producción de biogás diaria depende de la cantidad de sólidos volátiles que haya en la carga de estiércol. Por ello, para conocer la producción de biogás es necesario conocer previamente la cantidad de estiércol que se va a introducir diariamente al biodigestor, se debe determinar la cantidad de sólidos totales que hay en el estiércol (multiplicando Kg de estiércol por 0.17), y a partir de ese resultado, se estima los sólidos volátiles (multiplicando los sólidos totales por 0.77). Conocidos los sólidos volátiles, dependiendo del tipo de estiércol que se esté empleando, la producción de biogás será mayor o menor.

| Ganado | Factor de producción | Factor general |
|--------|----------------------|----------------|
| Cerdo | 0.25-0.50 | 0.39 |
| Bovino | 0.25-0.30 | 0.27 |

Ejemplo de estimación de producción de biogás

En el primer ejemplo de diseño de un biodigestor, se tenía una carga diaria de estiércol de 32.5 kg, y el volumen líquido del biodigestor era 5.850 m³.

Para estimar el biogás producido es necesario partir de la carga de estiércol, que en este caso es de 32.5 kg. Los sólidos totales, por tanto, serán:

$$ST = \text{carga diaria} \cdot 0.17 / V_L = 0.943 \text{ Kg/m}^3$$

Los sólidos volátiles serán:

$$SV = ST \cdot 0.77 = 0.726 \text{ kg/m}^3/\text{día}$$

La producción de biogás será:

$$PB = 0.27 \cdot SV = 0.196 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{m}^3_{\text{VL}}/\text{día}$$

Que para un biodigestor con un V_L de 5.850 m³ significa que cada día se va a producir 1.148 m³ o 1.148 litros de biogás ($PB \cdot V_L = 1.148 \text{ m}^3$).

5. Biodigestores familiares modelo para las tres ecorregiones

Aquí se presentan tres modelos de biodigestores familiares para tres regiones con temperaturas diferenciadas, que se pueden identificar de forma general para países andinos por:

Tabla 5.1: Identificación de ecorregiones según temperatura ambiente y altura

| Región | Temperatura ambiente | Temperatura de trabajo | Altura sobre el nivel del mar |
|-----------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Altiplano | -12 a 20°C | 6-10°C <i>(con invernadero)</i> | 2900-4500 |
| Valle | 5 a 30 | 15-20°C | 1800-2900 |
| Trópico | 13 a 38°C | 25-30°C | 0-1800 |

En cada lugar del mundo se puede plantear una tabla diferente a la anterior, ya que puede darse regiones con noches de helada en invierno por debajo de los 2000 metros de altura sobre el nivel del mar. En cada caso es importante la temperatura ambiente y la temperatura con la que se va a trabajar.

Estos modelos de biodigestores propuestos son ‘conservadores’ en cuanto a su funcionamiento en un amplio rango de temperaturas, y han de responder en todos los casos. Para que esto sea así se han dado tiempos de retención bastante superiores a los comentados en la ‘guía de diseño’.

Como criterio básico para un biodigestor familiar se ha considerado:

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

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

Además, se añade al final los diseños de biodigestores para saneamiento básico de baños para una familia tipo, en cada ecorregión.

5.1 Familias objetivo y requerimientos mínimos

Los biodigestores familiares propuestos están dirigidos para familias rurales, con la capacidad de recoger 20 kg de estiércol fresco al día y con acceso diario al agua. Estos son los dos criterios principales.

Para poder recoger 20 kg de estiércol al día basta con que la familia tenga una yunta de bueyes, tres o cuatro vacas que se pastoreen, o una o dos que estén tabuladas. De igual modo, pueden usarse otros tipos de estiércol, incluso mezclados, que cada día sumen 20 kg. Estos requisitos son muy comunes en familias rurales de Bolivia, y seguramente en la mayoría de países andinos.

El acceso al agua, no importa de qué calidad sea, suele dar más problemas, ya que no todas las familias tienen disposición de agua a lo largo de todo el año. En regiones donde falta agua durante uno o dos meses, no hay problema, ya que en estas épocas de escasez, se puede usar el fertilizante líquido de salida como “agua” de mezcla con el estiércol fresco. Se debe recordar en este punto que se puede sustituir parte del agua por el suero de la leche, disminuyendo por tanto las necesidades de agua.

La familia prototipo “ideal” en estos casos, es la pequeña productora de leche. Familias con tres o cuatro ganados lecheros, que aun pastoreando el ganado durante el día duermen cerca de la casa. Esto es importante para que la recogida de estiércol sea fácil. Estas familias muchas veces, además, cultivan alfalfa (“alfa”) para alimentar a sus ganados, y el fertilizante producido da muy buenos resultados con este cultivo en particular. Estas familias además suelen tener acceso al agua a lo largo de casi todo el año. En la producción de leche además, está el incentivo del suero que puede sustituir parte del agua.

5.2 Biodigestores familiares de altiplano

En el caso del altiplano, en regiones con noches de helada, es necesario que el biodigestor esté protegido por un invernadero (“carpa solar”), y esté aguantado sobre dos tápieles de 40 cm de ancho hechos de adobe.

El tamaño del biodigestor propuesto es de 8.10 metros de longitud, con polietileno tubular de 1.75 metros de ancho de rollo. Ya que habrá que dejar 50 cm por cada lado del plástico para amarrar los tubos de entrada y salida, es necesario añadir un metro a la longitud del plástico (aunque finalmente el biodigestor sea de 8 metros de longitud). Por ello, cada capa de plástico, ya que es doble, tendrá una longitud de 9.10 metros, empleando por tanto 18.20 metros para hacer el tanque con doble capa. El reservorio siempre se hace del mismo tamaño, empleando tres metros más de plástico.

Al estar el biodigestor protegido por la carpa solar y los tapiales laterales, no sufre por la radiación solar. La carpa solar es la que recibe la radiación solar y es la que antes se dañará por acción del mismo. Pero existen numerosos casos en Bolivia de carpas solares, que bien cuidadas, sobre todo contra la acción del viento (manteniéndolas tensas), llegan a durar hasta 10 y 11 años.

Biodigestor familiar modelo para Altiplano (con invernadero)

Carga diaria: 20 kg de estiércol (de vaca) y 60 litros de agua mezclados

Producción de biogás diario: 700-750 litros (4-5 horas de cocina)

Producción de fertilizante diario: 80 litros

Tiempo de retención: 75 días

Tiempo medio de demora en empezar a funcionar: 2 meses

Temperatura de trabajo: 10°C

Temperatura ambiente: -12 a 20°C

| | Altiplano |
|---|--------------|
| Volumen _{Líquido} | 6000 lts |
| Volumen _{gaseoso} | 2000 lts |
| Volumen _{Total} | 8000 lts |
| Ancho de Rollo | 1.75 m |
| Longitud de biodigestor y de la zanja (L/D) | 8.1 m (7) |
| Longitud _{plástico} por capa (se añade 1 m para amarre) | 9.1 m |
| Plástico total (con reservorio) por biodigestor | 21.2 m |
| Ancho inferior de zanja | 0.6 m |
| Ancho superior de zanja | 0.8 m |
| Profundidad de zanja | 0.9 m |
| Ancho de tapiales | 0.4 m |
| Altura tapial sur (en el hemisferio Sur) | 1.5 m |
| Altura tapial norte (en el hemisferio Sur) | 0.75 m |
| Longitud plástico de invernadero de 2 m de ancho | 9 m |

5.3 Biodigestores familiares de valle

Regiones de valle se caracterizan por llegar a tener alguna helada durante el invierno, pero nunca varias noches seguidas. Son regiones donde la temperatura media está en torno a los 18-20°C. En

este caso no es necesaria una carpa solar. De hecho se deberán aprovechar zonas soleadas para que el sol ayude a calentar el terreno. Es necesario proteger el biodigestor del sol, pues de otra manera terminaría dañando el plástico y se puede emplear una semisombra o un tejadillo, siempre ubicado en zonas soleadas.

Biodigestor familiar modelo para Valle

Carga diaria: 20 kg de estiércol (de vaca) y 60 litros de agua mezclados

Producción de biogás diario: 700-750 litros (4-5 horas de cocina)

Producción de fertilizante diario: 80 litros

Tiempo de retención: 37.5 días

Tiempo medio de demora en empezar a funcionar: 1 mes

Temperatura de trabajo: 20°C

Temperatura ambiente: 15 a 20°C

| | Valle |
|---|----------------|
| Volumen _{Líquido} | 3000 lts |
| Volumen _{gaseoso} | 1000 lts |
| Volumen _{Total} | 4000 lts |
| Ancho de Rollo | 1.5 m |
| Longitud de biodigestor y de la zanja (L/D) | 5.6 m (5.7) |
| Longitud _{plástico} por capa (se añade 1 m para amarre) | 6.6 m |
| Plástico total (con reservorio) por biodigestor | 16.2 m |
| Ancho inferior de zanja | 0.5 m |
| Ancho superior de zanja | 0.7 m |
| Profundidad de zanja | 0.8 m |

5.4 Biodigestores familiares de trópico

La región del trópico es la natural para los biodigestores. La validación y la difusión de los biodigestores

ha sido siempre en países tropicales. Esto es debido a la mayor temperatura ambiente, esto implica menor tiempo de retención, que influye directamente en el tamaño del biodigestor y por tanto los costes.

En estas regiones tampoco hace falta una carpa solar, ni semisombra, es más, conviene proteger el biodigestor del sol con un tejadillo de calamina, aluminio u hoja de palma.

Biodigestor familiar modelo para Trópico (protegido del sol)

Carga diaria: 20 kg de estiércol (de vaca) y 60 litros de agua mezclados

Producción de biogás diario: 700-750 litros (4-5 horas de cocina)

Producción de fertilizante diario: 80 litros

Tiempo de retención: 25 días

Tiempo medio de demora en empezar a funcionar: 3 semanas

Temperatura de trabajo: 30°C

Temperatura ambiente: 13 a 38°C

| | Trópico |
|---|----------------|
| Volumen _{Líquido} | 2000 lts |
| Volumen _{gaseoso} | 666 lts |
| Volumen _{Total} | 2666 lts |
| Ancho de Rollo | 1.25 m |
| Longitud de biodigestor y de la zanja (L/D) | 5.3 m (8.3) |
| Longitud _{plástico} por capa (se añade 1 m para amarre) | 6.3 m |
| Plástico total (con reservorio) por biodigestor | 15.6 m |
| Ancho inferior de zanja | 0.4 m |
| Ancho superior de zanja | 0.6 m |
| Profundidad de zanja | 0.7 m |

5.5 Biodigestores para saneamiento básico de baños

Los biodigestores familiares no conviene usarlos como saneamiento básico del baño, ya que se estará

restringiendo el uso de todo el fertilizante producido (se recomienda revisar la sección 4.1.12). Por ello, es conveniente tener un biodigestor único para recibir la descarga del baño y otro familiar para producción de biogás y buen fertilizante. De esta manera, los biodigestores para saneamiento básico del baño deben considerar mayores tiempos de retención (normalmente el doble de lo considerado para estiércol animal), para tener una mayor depuración de las aguas negras. Es necesario reducir la cantidad de agua de descarga de los baños, de 5 a 3 litros (introduciendo una botella de 2 litros llena de agua en el depósito de descarga). Se muestra un ejemplo de cálculo en la sección 4.4.3. El biogás generado se puede emplear para una ducha de agua caliente por 30 minutos al día.

Considerando lo anterior, el diseño de biodigestores para saneamiento básico de los baños, para una familia tipo formada por dos adultos y cuatro niños, sería:

Biodigestores para saneamiento básico de baños (protegido del sol)

Familia: 2 adultos y 4 niños

Carga diaria: 1.4 kg de heces y 15.6 litros de agua de descarga del baño

Producción de biogás diario: 75 (0.5 horas ducha de agua caliente)

Producción de fertilizante restringido diario: 17 litros

| | Trópico | Valle | Altiplano |
|--|-------------------|------------------|------------------|
| Tiempo de retención (días) | 50 | 70 | 120 |
| Volumen _{Líquido} (litros) | 850 | 1190 | 2040 |
| Volumen _{Total} (litros) | 1130 | 1583 | 2713 |
| Ancho de rollo | 1 m | 1 m | 1.25 m |
| Longitud de biodigestor y de la zanja | 3.5 m | 5 m | 5.5 m |
| Longitud de plástico requerido (se añade 1 m para amarre en cada capa) | 9 m | 12 m | 13 m |
| Ancho inferior de zanja | 0.3 m | 0.3 m | 0.4 m |
| Ancho superior de zanja | 0.5 m | 0.5 m | 0.6 m |
| Profundidad de zanja | 0.6 m | 0.6 m | 0.7 m |
| Costo total estimado (1€=11Bs) <small>(flange, tubos de entrada y salida, llave, tee, liga, conducción 10 metros)</small> | 422 Bs 38.36 € | 480 Bs 43.66€ | 565 Bs 51.36€ |

6. Manual de instalación de biodigestores familiares

Este documento pretende explicar los pasos para la construcción, instalación y manejo de un biodigestor de polietileno tubular. Existen muchos otros manuales muy completos y prácticos publicados en internet como en libros. Además, a través de internet se pueden descargar videos en los que se muestra la instalación de un biodigestor.

Entre diferentes manuales se encuentran aplicaciones de diferentes técnicas, propias de una tecnología adecuada como ésta. Estas técnicas diferentes no son exclusivas y cada persona puede ir añadiendo nuevas formas de hacer las cosas según aumente su experiencia.

Inicialmente, se detallan las herramientas y materiales necesarios para la construcción e instalación de un biodigestor hasta la cocina. Y se pasa a detallar de forma narrativa, la construcción de los diferentes elementos, dando alternativas en algunos casos para su construcción o instalación.

En varios casos entre paréntesis se han puesto sinónimos u otras formas de llamar un mismo elemento.

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

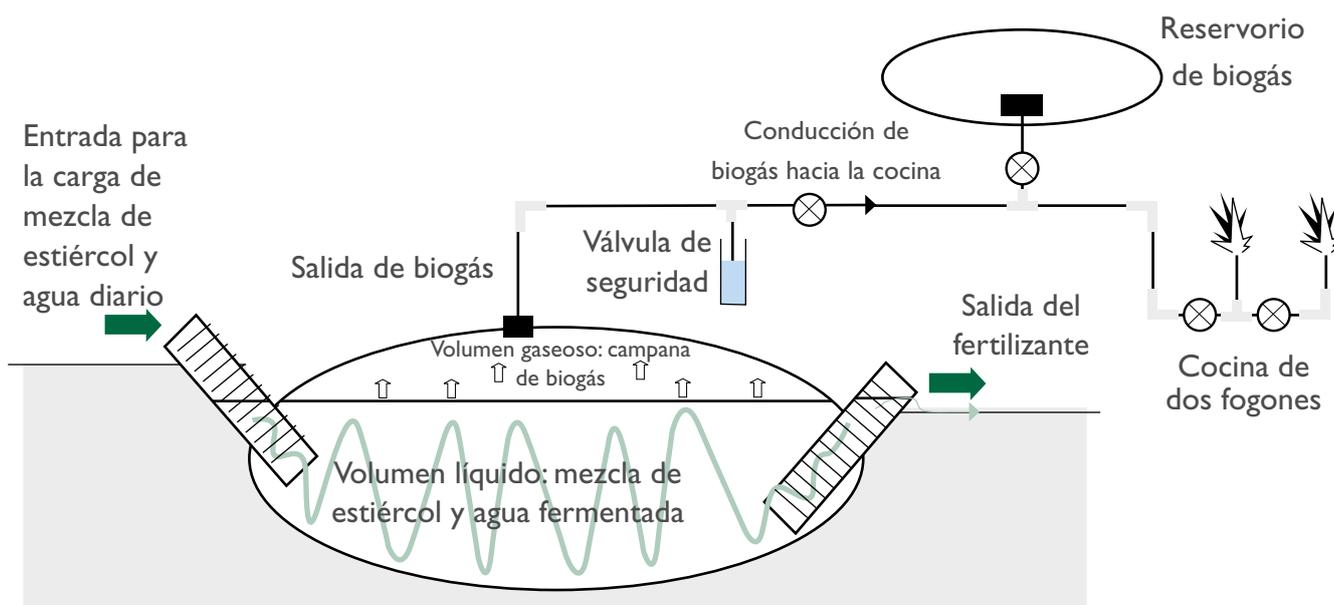


Figura 11: Esquema del sistema completo del biodigestor familiar, junto la con la conducción de biogás hasta la cocina, considerando la válvula de seguridad y el reservorio de biogás.

6.1 Materiales necesarios y costo estimado

Todos los materiales necesarios para la construcción de un biodigestor están disponibles en los mercados de cualquier país.

El material más particular es el polietileno tubular, ya que normalmente se deberá pedirlo de 300 micrones de grosor, cuando éste se fabrica en 200 micrones para su uso en carpas solares. Además, ya que se pide su fabricación con mayor espesor (300 micrones), se exige un color “negro humo”, que se ha notado es más resistente a la radiación solar. Como ya se ha explicado en la “guía de diseño”, este material se vende por unos anchos de rollo fijos, y por tanto habrá que pedir el ancho de rollo que convenga para cada tipo de biodigestor.



Figura 12: Pasamuros o flange.

Otro material, que en algunos países ha sido más complicado de encontrar, son los “pasamuros” (o flanges). Simplemente es el accesorio de conducción que va a permitir que el biogás salga del interior del biodigestor, atravesando la doble capa, para que avance por la conducción. Este accesorio está compuesto por un macho y una hembra de rosca, con discos sólidos a modo de tuercas. El macho atravesará la doble capa de plástico desde el interior y la hembra se enroscará por encima. Apretando ambos se hará un “sándwich” que sellará el agujero que se ha hecho sobre la doble capa. Para que el sellado sea hermético, se emplearán discos de goma (que pueden ser hechos con cámaras de las ruedas de los autos) con un agujero central del tamaño del macho, que irán colocados entre los discos del “pasamuros” y la doble capa de plástico, aprisionándola entre ellos. Si no existiese pasamuros en alguna región, uno los puede fabricar con materiales locales. En la sección 6.4.2 se verá esta parte.

Por lo demás, los tubos de entrada y salida del biodigestor son tuberías de 6” de desagüe, normalmente en PVC. Se pueden emplear tuberías de cemento, pero son más pesadas y pueden romperse en su manipulación. El amarre entre estas tuberías y el polietileno tubular se hace con ligas hechas con cámaras de rueda de auto de unos 3 cm de ancho. La conducción de biogás se realiza en tubería PED (o ‘politubo’ o manguera de riego de PCV) de ½” pulgada, empleando codos y ‘tees’ de plástico. Se recomienda que las llaves sean de bola, ya que otras normalmente están pensadas para conducciones de riego y no serán totalmente herméticas cerradas para el biogás.

Materiales y presupuesto estimado para biodigestores familiares modelo
(en bolivianos, dólares y euros al siguiente tipo de cambio
1\$us=0.7 €; 1 € = 11,6 Bs; 1\$us=7,5 Bs)
(Costes en abril de 2008 en la ciudad de La Paz, Bolivia)

| Material | Unidades por biodigestor | | Precio unidad (Bs) | Precio por biodigestor | | | |
|----------------------|---|-----------|--------------------|--------------------------|--------------|-----------|--------|
| | | | | Bolivianos (Bs) | Dólares (\$) | Euros (€) | |
| Conducción de biogás | Tubería de PCV de ½" | (+/-) 25m | | 5bs/m | 25 | 16,67 | 9.09 |
| | Llaves de bola ½" de plástico | 4 | | 35 | 140 | 18,67 | 8.73 |
| | Flange ½" de plástico | 2 | | 20 | 40 | 5,33 | 5.09 |
| | Codos PCV ½" | 4 | | 1,5 | 6 | 0,8 | 1.27 |
| | Niple PCV ½" | 2 | | 2.50 | 5 | 0,67 | 0,43 |
| | Tee PVC ½" | 4 | | 2,5 | 10 | 1,33 | 0,86 |
| | Teflón | 2 | | 1,5 | 3 | 0,4 | 0.26 |
| Cocina | Codo metálico ½" | 2 | | 3 | 6 | 0,8 | 0,52 |
| | Tubos metálicos ½", 12cm | 2 | | 7 | 14 | 1,87 | 1.21 |
| | Tubos metálicos ½", 7cm | 2 | | 5 | 10 | 1.33 | 0,86 |
| Biodigestor | Tubería PVC 6" | 2m | | 47,25 Bs/m | 94,5 | 12,6 | 8,15 |
| | Liga de neumático | 60m | | 1,5 Bs/m | 90 | 12 | 7,76 |
| | Polietileno tubular (300 micrones color negro humo) | Trópico | 15.6m | 30,24 Bs/m (AR 1.25m) | 480,82 | 64,11 | 41,45 |
| | | Valle | 16.2 m | 36,3 Bs/m (AR 1.50m) | 588,06 | 78,41 | 50,69 |
| | | | 21.2 m | 42,34 Bs/m (AR 1.75m) | 897,61 | 119,68 | 77,38 |
| Carpa solar | Altiplano | 9 m | 25 Bs/m (AR 2m) | 225 | 30 | 19,4 | |
| Total | Trópico | | | | 1024,32 | 136,58 | 88,3 |
| | Valle | | | | 1131,56 | 150,87 | 97,55 |
| | Altiplano | | | | 1666,11 | 222,15 | 143,63 |

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

Materiales adicionales que no tienen coste específico

| Material | Uso |
|------------------------------------|---|
| Paja o arena | Para el fondo de la zanja |
| Sacos o plásticos viejos | Para las paredes de la zanja |
| Lana de acero (bombril, estropajo) | Para la válvula de seguridad |
| Alambre de amarre y estacas | Para fijar las tuberías de entrada y salida |
| Palos de 2 metros de madera | Para el invernadero en altiplano |
| Clavos | Para fijar los sacos a las paredes de la zanja, y el invernadero en altiplano |

Las herramientas necesarias para la construcción de un biodigestor son típicas de conducciones de agua, como una tarraja para hacer rosca en la tubería que conducirá el biogás, o llaves ‘estilson’ (de fontanero) para apretar los accesorios de conducción. Estas herramientas son fáciles de encontrar. La selladora manual de plástico se usará para hacer el reservorio de biogás, y conviene comprarla si es que se van a construir varios biodigestores. Si es un único biodigestor, uno puede prestarse de alguna organización que venda producto embolsado (patatas fritas, leche, yogurt, etc.)

Presupuesto estimado de herramientas para instalación de biodigestores
(en bolivianos, dólares y euros al siguiente tipo de cambio
1\$us=0.7 €; 1 € =11,6 bs; 1\$us=7.5 Bs)
(Costes en abril de 2008 en la ciudad de La Paz, Bolivia)

| Material | Precio Unidad(Bs) | Precio Dólares (\$us) | Precio Euros (€) |
|---|-------------------|-----------------------|------------------|
| Tarraja ½” | 40 | 5.19 | 3.66 |
| SERRUCHO | 50 | 6,67 | 4,31 |
| Tijera | 70 | 9.09 | 6.36 |
| Llave ‘estilson’ # 10 | 150 | 19.48 | 13.66 |
| Selladora manual plástico (30cm) | 200 | 26,67 | 17,24 |
| Manguera transparente para nivel (12 m) | 24 | 3.12 | 2.18 |

6.2 Selección del lugar donde estará el biodigestor

El biodigestor debe estar en un punto intermedio entre la cocina y el lugar donde duerman los ganados. Esto es para que la recogida de estiércol fresco cada mañana sea lo más fácil posible, a la vez que se ahorra en conducción de biogás al ser menor el recorrido.

Es importante considerar que la zanja del biodigestor no debe interrumpir el camino de animales o personas.

La zanja, en lugares de altiplano, deberá estar orientada a lo largo de este a oeste. En valle o trópico la orientación no es tan importante, ya que la radiación solar no juega un papel importante en el calentamiento directo del biodigestor.

En valle, la zanja deberá estar en zonas soleadas, nunca de sombra, ya que la radiación solar ayudará a calentar el terreno donde esté ubicada la zanja. El biodigestor, como ya se ha dicho deberá estar protegido por el sol por una semisombra o techumbre.

En trópico, el ambiente caluroso ya es suficiente para hacer funcionar correctamente el biodigestor, y por tanto su ubicación no tiene por qué estar orientada, y debe de primar la facilidad de la construcción. En este caso es obligatoria la protección del biodigestor con una techumbre.

El biodigestor no debe tener ramas de árboles sobre él, ya que con el viento estas pueden caer y dañarlo. En caso de altiplano se deberán cuidar las sombras que los árboles del entorno pudieran producir sobre la carpa solar.

6.3 Dimensiones y acabado de la zanja

Una vez ubicado el lugar donde estará el biodigestor se cavará una zanja. Las dimensiones de la zanja dependen del ancho de rollo que se use para el biodigestor.

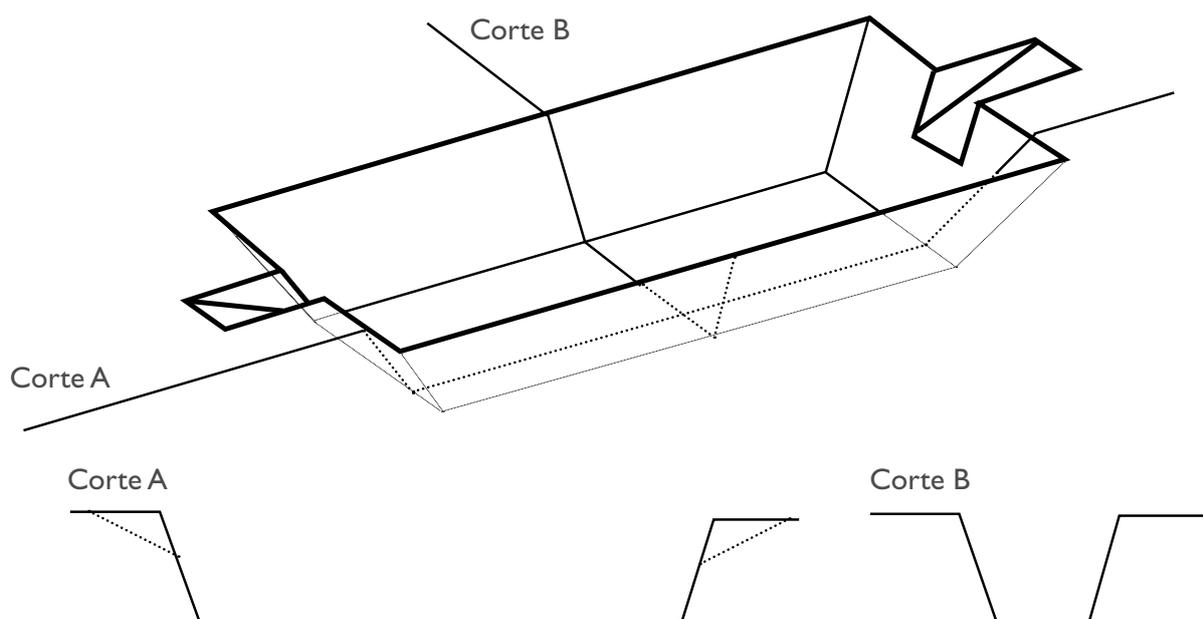
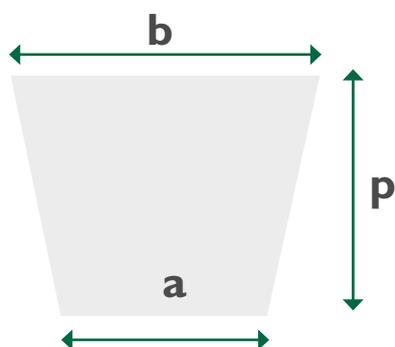


Figura 13: Forma de la zanja, con sus dos cortes. En ellos se ve que la zanja tiene las paredes inclinadas (chaflán). También se puede ver los huecos para la entrada y la salida. De no poder cavar el terreno, habrá que levantar tapiales tratando de mantener las formas.

Conviene que las paredes de la zanja tengan forma de ‘chaflán’ (las paredes inclinadas en forma de “v”), evitando de esta manera que se desmoronen las paredes. Además, se aproxima más a la forma tubular del biodigestor. Las cuatro paredes, las dos laterales, la de la entrada y la de salida, han de tener esta forma de “chaflán”.



Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)

| AR (m) | 2 | 1.75 | 1.5 | 1.25 | 1 |
|--------|-----|------|-----|------|-----|
| a(m) | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 |
| b(m) | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |
| p(m) | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 |

La zanja no ha de tener desnivel, aunque se permite hasta un 5% de desnivel. Es preferible una zanja a nivel.

En casos en que el terreno sea duro por encontrar piedra o roca, se puede tomar como alternativa levantar tapias de adobe en vez de seguir cavando.

Para la entrada y salida, se deberá cavar un canal inclinado, con un ángulo de 45° en sus paredes correspondientes.

Una vez construida la zanja, se quitarán las piedras y raíces que asomen a ésta, para evitar que puedan dañar al biodigestor.

Tras esto, se forran los laterales de la zanja, las cuatro paredes, con telas viejas de sacos (“gangochos”, “sacañas”). Se puede emplear también plásticos viejos de carpas solares. Finalmente, todas las paredes estarán recubiertas de forma que cuando se instaló el biodigestor, éste no sufrirá daño al rozarse con las paredes cuando se esté acomodando.

El fondo de la zanja, aun al descubierto se ha de forrar o rellenar, con arena fina de río, con paja o igualmente con telas de sacos viejos o plásticos. Esto es para que el biodigestor se acomode bien cuando se esté realizando la primera carga. En algún caso se ha rellenado el fondo con estiércol, de forma que al poner luego el biodigestor sobre éste, fermentará aumentando la temperatura y ayudando a que se inicie el proceso más rápidamente.

Habiendo cavado la zanja con las dimensiones acordes al ancho de rollo que se va a usar, quitando las piedras y raíces de las paredes, forrándolas, y cubriendo el suelo, el biodigestor estará listo para ser instalado.

6.3.1 Caso de biodigestores de altiplano

En el caso del altiplano, igualmente se cava la zanja como se ha explicado anteriormente, pero es necesario que en los laterales se construyan dos tapias de 40 cm de grosor, y tan largos como sea la zanja. El tapial orientado al sur (para el hemisferio sur) tendrá una altura de 1 metro, y el tapial norte de 1.50 metros, de forma que sobre ellos irá colocada la carpa solar quedando con caída de



Figura 14: En el caso de biodigestores de altiplano, es necesario construir dos tapiales de adobe de unos 40 cm de grosor. Estos tapiales servirán de base para la carpa solar.

agua. Una vez que se instale el biodigestor, es necesario terminar de cerrar el invernadero por los lados de la entrada y la salida levantando adobe o tapial.

6.4 Construcción del biodigestor

Los materiales necesarios para la construcción del biodigestor son:

- Rollo de polietileno tubular
- 50-60 metros de liga de neumático
- 2 tubos de PVC de 6" pulgadas y de 1m de largo
- Pasamuros ("flange")

Como herramientas para esta parte se necesita:

- Sierra
- Tarraja ½"

- Llave “estilson” (de fontanero) o llave inglesa
- Teflón
- Tijeras

Listos los materiales y herramientas se comienza la construcción del biodigestor. Es importante realizar esta parte sobre una superficie libre de piedras u objetos que pudieran dañar al plástico. Se puede hacer en un lugar con hierba densa, revisando antes que no haya piedras sobresalientes, o sobre el suelo de una habitación grande, habiendo barrido anteriormente, o llevando unas lonas gruesas para echar sobre el suelo en cualquier lugar y trabajar sobre ellas.

6.4.1 Doble capa de plástico

Lo primero es cortar dos piezas del plástico del tamaño deseado. Recordar en este punto que se ha de cortar un metro más de plástico que el tamaño final del biodigestor, ya que ese metro se usara en amarrar 50 cm a la tubería de entrada y 50 cm para la salida.



Figura 15: Para hacer la doble capa de plástico es necesario que alguien atraviese toda la manga de plástico arrastrando la otra capa a su interior. En este caso es un ancho de rollo de 1.75 m y es fácil para una persona adulta caminar por dentro.

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

6.4.2 Salida de biogás

Cuando recién se tenga la manga de plástico con doble capa hay que hacer la salida para el biogás usando un pasamuros (“flange”).

El pasamuros, si no se puede conseguir en alguna ferretería, se puede fabricar. En algún caso, incluso se ha usado el desagüe de un lavamanos como pasamuros. Pero si no, hay que conseguir un macho y hembra de rosca de ½” pulgada. Además se deberá conseguir dos discos rígidos de plástico (limando sus bordes) a los que se les hace un agujero central del tamaño del macho. Conviene que el tamaño de estos discos rígidos no sea inferior a 10 cm de diámetro. Otros dos discos, ahora de plástico blando (con la cámara de los neumáticos) de diámetro superior a los discos rígidos, y a los que también se les hace un agujero central del mismo tamaño. De esta manera se hará un sándwich sobre el agujero que se fabrique sobre la doble capa de plástico de la siguiente manera:

macho - disco rígido - disco blando - doble capa de plástico - disco blando - disco rígido - hembra



Figura 16: para la colocación del pasamuros (o flange) hay que hacer un corte en la parte central de la manga de doble capa. Con unos discos de goma, y apretando posteriormente, la flange será una salida sellada al biodigestor que permitirá llevar el biogás hasta la cocina.

Teniendo el pasamuros, hay que hacer un corte pequeño sobre las dos capas de plástico. Conviene hacer este corte sobre la mitad del biodigestor, pero más cerca de la entrada. Por ejemplo, para un biodigestor de 8 metros se tendrá una manga de doble capa de 9 metros. Desde la entrada, los primeros 50 cm serán para el amarre y a partir de este punto, a tres metros se hará la salida de biogás y por tanto el corte será 3.50 m del extremo de la entrada. Esto es por si hubiera algún tiempo de pendiente en la zanja, de forma que la campana de biogás se generará más cerca de la entrada, y de esta manera el biogás podrá salir.

Se realizará el corte sobre los dos plásticos bien solapados, formando una pequeña “tienda de campaña” (carpa, triángulo) con un dedo y cortando la punta. Es mejor un corte pequeño, pues si no se puede introducir la flange, se abrirá el corte cuidadosamente, poco a poco, hasta que la flange pueda atravesarlo.

Una vez hecho esto, se coloca el disco blando y se aprieta con la “hembra” usando primero la fuerza manual y luego ajustando con una llave “estilson”. De manera que la doble capa quedará aprisionada entre dos discos de goma blanda apretados por la rosca entre el macho y la hembra.

Para finalizar la salida de biogás, se corta una pieza de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ ” de un metro o metro y medio, se tarraja (se hace rosca) los dos extremos y con teflón en la unión (al menos cinco vueltas en contra del sentido de la rosca) se enrosca a la salida de biogás (al pasamuros o flange). En el otro extremo de la tubería de $\frac{1}{2}$ ” se coloca una llave de bola y la cerramos.

6.4.3 Tubos de entrada y salida

Una vez hecha la salida de biogás, es momento de cerrar los extremos de la manga de plástico amarrándolos a las tuberías de entrada y salida. Ambos casos son idénticos.



Figura 17: Las tuberías de entrada y salida son de PVC de 6” de diámetro. Normalmente se compra un tubo de 4 m, que hay que cortar en cuatro piezas de un metro cada una. Hay que proteger las bocas del tubo de entrada y el de salida que van a estar dentro del biodigestor. Amarrando liga neumática sobre el canto es suficiente.

Lo primero es proteger la boca del tubo que va a estar en el interior del biodigestor. Esto es para que durante el amarre y la manipulación, el filo del tubo normalmente áspero, no dañe al plástico.

Para ellos basta con tomar la liga de neumática y amarrarla sobre la boca de la tubería cubriendo por unos milímetros el filo de ésta. La liga se amordaza sobre sí misma.

6.4.4 Amarre de la entrada y salida

Teniendo los tubos de PCV de 6" y 1 m de largo ya protegidos, se colocan en los extremos del biodigestor, introduciéndolos dentro de la manga de doble capa unos 80 cm, y por tanto dejando a la vista 20 cm.

Ahora hay que acomodar el plástico para poderlo amarrar a los tubos. Para ellos se coge un lateral de plástico y se le van haciendo pliegues en forma de acordeón. Así se va recogiendo el plástico hasta ponerlo contra el tubo. Se procede de igual manera con el otro lateral. Conviene que los pliegues no generen arrugas entre unos y otros y que los pliegues sean largos abriéndose a lo largo del resto de la manga de plástico.



Figura 18: Para amarrar los tubos de entrada y salida al biodigestor, hay que colocarlos centrados, recoger el plástico lateral haciendo pliegues en forma de acordeón, y comenzar a amarrar con liga de neumático.

Hecho esto en ambos lados del tubo, se miden 50 cm a partir del origen del plástico, y a partir de ese punto se empieza a amarrar con la liga de auto. Esto significa que dentro del biodigestor quedarán 30 cm de tubería sin amarrar.

Así, cuando se va a comenzar a amarrar, quedarán 20 cm de tubo a la vista, 50 cm que serán amarrados sobre el plástico y 30 cm en el interior libres.

Para amarrar la liga, cada vuelta tiene que solaparse por encima con la anterior. De esta manera se va ascendiendo por el tubo poco a poco. Este amarre tiene que ser fuerte y en caso de que se rompa la liga no hace falta empezar de nuevo ya que se puede continuar sobre la parte ya amarrada. Es muy importante que quede tensa la liga y solapada sobre la anterior vuelta. Una vez que se ha amarrado los 50 cm de plástico se continúa amarrando sobre la tubería 10 cm más. Este proceso se hace tanto para la entrada como para la salida del biodigestor.



Figura 19: Biodigestor ya construido y listo para ser instalado.

Teniendo ya construido el biodigestor, que básicamente ha sido meter una capa de plástico dentro de otra, hacer la salida de biogás, proteger los tubos de entrada y salida y amarrar los extremos de la manga de doble capa a éstos; el biodigestor está listo para ser instalado.

Todo este proceso lleva en torno a dos horas, según la experiencia de cada uno.

6.5 Instalación del biodigestor

La instalación de biodigestor se realiza al menos entre dos personas, si son más personas mejor. Lo más importante es proteger el biodigestor de rozaduras con el suelo o cualquier otro objeto en el traslado. En esto hay que tener un serio cuidado, pues un hueco en el plástico hará que este ya no sirva.

6.5.1 Introducción en la zanja

El biodigestor ya construido hay que meterlo en la zanja preparada, con sus paredes forradas y el suelo relleno.

Para ellos lo mejor es desplegar el biodigestor, y entre varias personas transportarlo hasta la zanja formando 'un tren'. Cada persona tiene que preocuparse de que no roce con nada el plástico, para ello lo mejor es voltear los bordes laterales del biodigestor doblado hacia el centro. De este modo se inserta en la zanja.

Una vez ubicado dentro de la zanja, conviene revisar que la parte inferior no tenga arrugas, estirando de ambos extremos del biodigestor y si hace falta metiendo alguien dentro de la zanja. De existir arrugas, éstas luego no podrán ser quitadas, que el peso de los metros cúbicos de lodo en el interior del biodigestor lo impedirán.

6.5.2 Niveles de salida y lodo

Asentado ya el biodigestor toca calcular los niveles de la tubería de salida y entrada.

La profundidad de zanja se corresponde con el nivel máximo que alcanzará el lodo dentro del biodigestor. Para que este sea el nivel, es necesario que la salida; la boca externa del tubo esté a ese nivel. Para ello se usa una manguera transparente para calcular el nivel.

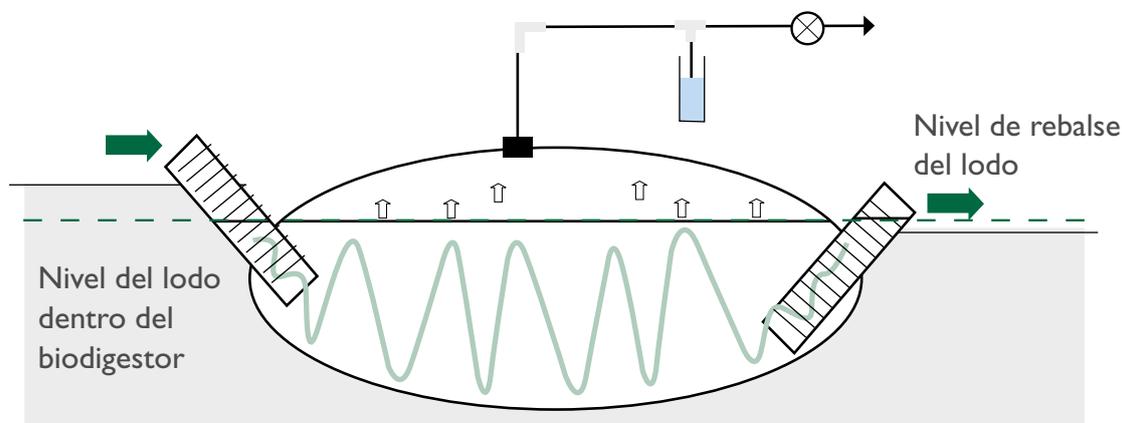


Figura 21: Es muy importante colocar los tubos de entrada y salida para que el nivel del lodo sea óptimo. El nivel del lodo lo da la boca de salida, y tiene que ser equivalente a la profundidad de la zanja. El tubo de entrada se coloca de tal manera que la parte media de la zona amarrada coincida con el nivel de salida.



Figura 20: Una vez construido el biodigestor hay que meterlo en la zanja, con mucho cuidado de que no rocen los pliegues del plástico con ninguna pared ni piedra, ya que se podría dañar el plástico. Esta es una parte crítica en la que hay que extremar los cuidados.

Una vez que la parte inferior de la boca externa del tubo de salida está al nivel para que el biodigestor se llene hasta una altura igual a la profundidad de la zanja, se ajustará el tubo de entrada. En este caso el tubo de entrada estará más elevado, y el nivel del lodo (que corresponde con el nivel de la salida) debe quedar en medio de los 50 cm de amarre de la tubería de entrada.

Determinados los niveles, conviene amarrar los tubos para que queden fijos. Cuando se empieza a cargar el biodigestor, éste va a jalar de los tubos hacia dentro de la zanja y por ello es necesario sujetarlo.

Para ello se hace un agujero pequeño en los tubos con la punta de un cuchillo o tijera, y se clava una estaca a medio metro. Pasando el alambre de amarre por el agujero del tubo se sujeta a la estaca.

Una vez hecho esto, es muy recomendable cubrir los 50 cm de amarre de los tubos de entrada y salida con un saco viejo para que el sol no termine quemando las ligas neumáticas.

6.5.2 Primera carga de llenado

Una vez instalado el biodigestor se procede a realizar la primera carga de estiércol y agua.

En esta carga lo más importante es echar buena cantidad de estiércol fresco y llenar hasta que las bocas interiores de los tubos de entrada y salida queden tapadas por el lodo. En cuanto se logre tapar la parte interior de los tubos, el aire ya no tendrá acceso al interior del biodigestor, esencial para que se produzca metano.

La primera carga es importante pues de ella depende que se comience antes o después a producir biogás. De forma general conviene acumular estiércol fresco durante los siete días anteriores a la instalación, para que el día de la primera carga se tendrá suficiente material. En esta primera carga no es necesario andar mirando



Figura 22: Para medir los niveles de salida es muy fácil se debe emplear una manguera transparente llena de agua que dará el nivel.

Determinada la posición de las tuberías de entrada y salida, se les hace un agujero pequeño y se pasa alambre de amarre que las sujetará a una estaca.

la mezcla de estiércol y agua y basta con echar al menos unas 7 carretillas de estiércol fresco y mezclarlo con agua suficiente para que entre suelto al biodigestor y seguir echando agua hasta que las bocas interiores de los tubos queden cubiertas.

Hecho esto, toca cada día alimentar al biodigestor con las carga de mezcla diaria estimada. Para los biodigestores modelo propuestos es de 20 kg de estiércol con 60 litros de agua.

6.5.3 Cierre del invernadero para el caso de altiplano

Una vez realizada la primera carga del biodigestor, en el caso del altiplano, hay que cerrar el invernadero (carpa solar).

Lo primero es colocar unos palos que vayan de tapial a tapial, de lado a lado del biodigestor. Estos palos podrán ser redondos o planos, normalmente de 2 metros de longitud. Para un biodigestor de 8 metros se emplearán 9 palos colocados a cada metro. Conviene enterrar los palos en el tapial, sobresaliendo por los extremos laterales. De esta manera, la carpa solar se apoyará sobre el tapial.

Una vez colocados los palos, la forma más eficiente que se ha encontrado es: sobre los tápiales echar unos 2-3 cm de barro fresco suelto, sobre este barro colocar tensa la carpa solar, y volver a echar otros 5 cm de barro fresco, de manera de obtener casi un cierre hermético. Sobre este barro exterior conviene poner piedras o paja para que las lluvias no se lleven todo el barro.

Para asegurar la carpa solar contra el viento se puede tensar un par de ligas a lo largo del invernadero, para que la carpa solar quede apretada contra los palos. Otra alternativa es clavar la carpa solar a los palos. Para ello se emplean ligas de neumático, que colocadas sobre el plástico en las partes correspondientes a los palos, se clava la liga de neumático sobre el palo, dejando al plástico entre ambos.



Figura 23: Biodigestor ya instalado, y empezando a ser cargado de agua y estiércol hasta que se tapan las bocas interiores de los tubos de entrada y salida.



Figura 24: Biodigestor de altiplano ya funcionando con carpa solar.



Figura 25: En el caso de altiplano hay que poner la carpa solar. Primero se ponen unos palos enterrados en los tapiales, sobre ellos se echa una capa de barro fresco, encima la carpa y de nuevo barro fresco.

Se puede usar aislantes naturales para el invernadero, como es paja (totora, por ejemplo). La colocación del aislante natural debe ser en las paredes exteriores de los tapiales, nunca en la parte interna. Esto es porque los tapiales van a ganar el calor desde dentro del invernadero y poniendo el aislante fuera, se evita que este calor se pierda, pero si ponemos el aislante dentro del invernadero, se estará impidiendo que el tapial se caliente.



6.6 Conducción de gas

Los materiales necesarios para realizar la conducción de biogás:

- 25 metros de tubería de PCV de ½” (politubo, tubería de riego)
- 4 codos PVC de ½”
- 4 nipples PVC de ½” (adaptadores)
- 4 tee PVC de ½”
- 4 llaves de bola de ½” de plástico
- Reservorio
- 2 tubos de hierro de ½” con rosca de 12 cm
- 2 tubos de hierro de ½” con rosca de 7 cm
- 2 codos de hierro de ½” con rosca

Como herramientas para esta parte se necesita:

- Sierra
- Tarraja ½”
- Llave “estilson” (de fontanero) o llave inglesa
- Teflón
- Selladora manual

Una vez instalado el biodigestor, es momento de continuar la conducción de biogás desde el biodigestor hacia la cocina.



Figura 26: La conducción de biogás se hace con tubería de riego (politubo, tubería PED, tubería de pvc) de ½”, se usan los accesorios comunes, siempre con rosca.

El biodigestor instalado tiene la salida de biogás preparada, con un pasamuros, una tubería de ½” de diámetro y un metro de longitud acabada en una llave de bola.

A partir de este punto, se continúa con tubería de ½” de PCV (“politubo” o tubería de riego) hasta la cocina. Esta debe ser de forma aérea, la tubería elevada sobre postes, o apoyada a cierta altura sobre una pared. Esto es para tener acceso a ella. Las longitudes máximas son 100 metros, ya que para mayores convendría usar tubería de mayor diámetro. Lo óptimo es tener el biodigestor entre 20 y 50 m de distancia a la cocina.

La conducción se hace directa, empleando codos y niples (acoples) cuando sea preciso.

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

6.6.1 Acumulación de agua

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



Figura 27: En los puntos bajos de la conducción de biogás se puede poner una tee con la tercera salida cerrada con una rosca. De esta manera si se acumula agua en este punto bajo, se puede purgar abriendo la rosca de la tee.

6.6.2 Válvula de seguridad

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



Figura 28: La válvula de seguridad se coloca al principio de la conducción de biogás, cerca del biodigestor, para poder ver todos los días si necesita más agua.

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

A la salida de la conducción de biogás, tras la primera llave de bola, que había servido para cerrar la salida de biogás, se coloca una tee, de manera que el biogás pueda seguir fluyendo hacia la cocina, pero a la tercera salida de la tee se le une una pieza de tubería y ésta se introduce en la botella de refresco llena de agua. La tubería debe quedar sumergida en el agua de 8 a 13cm, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar del lugar, la distancia a la cocina, y el tipo de cocina. Cuanta mayor altura, menor presión se necesita y menos tiene que estar sumergido el tubo en el agua. Cuanta mayor distancia a la cocina mayor presión se necesita y más sumergido ha de estar el tubo. Si es una cocina tradicional para gas (ya manipula para funcionar con biogás) también conviene aumentar la presión. Para determinar la presión idónea es necesario ir realizando pruebas de la combustión de biogás en la cocina hasta que el usuario éste conforme.

Tras la válvula de seguridad conviene colocar una llave de paso, de forma que se pueda aislar el conjunto formado por el biodigestor y la válvula de seguridad del resto de la conducción para posibles reparaciones o modificaciones.

La válvula de seguridad, es el primer elemento que se ha de encontrar en la salida de biogás la conducción. En caso de que se coloque como primer elemento una llave de bola y después de esta la válvula, se corre el riesgo de que la llave quede cerrada por descuido o mala intención, y entonces el biogás producido en el biodigestor no tendrá forma de salir y terminará reventándolo.

Hay que darse cuenta que la presión máxima del biogás va a estar dada por la profundidad a la que esté sumergida la tubería dentro del agua.

Dentro de la tubería que llega a la botella de refresco llena de agua, se introduce lana de acero (estropajo de acero, “bombril”). Esta operación tiene dos funciones: por un lado, va a retener parte del ácido sulfhídrico que está en el biogás, quitando olores, y por otro lado, va a impedir que una combustión externa pueda propagarse por la tubería, evitando así peligro de explosiones. Conviene cambiar esta lana de acero o hierro cada seis meses, por eso está colocada en la válvula de seguridad accesible para su recambio.

6.6.3 Reservorio de biogás

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

6.6.3.1 Construcción del reservorio

El reservorio se hace con el mismo plástico con que se ha construido el biodigestor, empleando una única capa. Se corta un pedazo de tres metros de manga, y al igual que al biodigestor, hay que ponerle un pasamuros (flange) en su zona central. Se emplea la misma técnica que en el biodigestor.

Una vez colocado el pasamuros se sellarán los laterales de la manga para cerrarla. De esta manera, la única manera de entrada o salida del biogás será por el pasamuros.



Figura 29: El reservorio se construye con 3 metros de polietileno tubular. Tras poner un pasamuros (o flange) en el centro, se sellan los extremos del plástico con una selladora manual.



Figura 30: Se amarran los lados sellados, plegándolos en forma de acordeón, contra un objeto hueco, para poder pasar una pita por el hueco y así colgar el biodigestor del techo.

Para sellar los laterales, se usa una selladora manual de plástico. Estas son fáciles de encontrar en los mercados y su costo no es muy alto. Merece la pena comprar una si se piensa hacer varios biodigestores. En caso de un único biodigestor conviene prestarse. Estas selladoras son de 30 y 40 cm de brazo, y para sellar todo el borde de la manga de plástico, habrá que hacer “zig-zag” sobre el borde, sellando por tramos, teniendo cuidado de que los laterales del plástico queden bien sellados, pues justamente en esos pliegues pueden haber descuidos. En caso de duda, hacer doble sellado repitiendo la operación.

Es necesario hacer pruebas previamente para regular la potencia de estos selladores, asegurando así que el plástico quede bien sellado.

Habiendo sellado ambos laterales, se hacen pliegues en forma de acordeón en los extremos del reservorio y se amarran con liga de auto. Esto es para que la presión de biogás no abra los tramos sellados. Además de que se puede poner alguna pieza hueca en los extremos y amarrar el plástico sobre ella, para más tarde poder pasar una sogá (cuerda, pita) y colgar el reservorio del techo. Normalmente se pueden usar como pieza hueca un trozo de tubo viejo, amarrando el plástico a su entorno, y así poder pasar una sogá por el interior del tubo y colgar el biodigestor.

Construido el reservorio, habrá que conectarlo a la conducción de biogás. Para ello se pone una “tee” en la conducción donde por una entrada va a venir el biogás del biodigestor, por otra ir hacia la cocina, y por otra va a conectarse al reservorio. Es normal poner una llave de bola a un metro de conducción de reservorio, para poder cerrarla y aislarla en caso de que se pinche o haya fuga.

Una vez sellados los extremos del reservorio se tiene un tanque hermético cuya única salida es la flange central. Normalmente se recogen los extremos, plegándolos como acordeón y se amarran entorno algún elemento hueco, por ejemplo un pedazo de tubería para poder pasar una pita por ella y colgar el

biodigestor. Téngase en cuenta que el plástico estará cerrado y sellado y se amarra entorno a la tubería solo para poder colgar el biodigestor, por ello no es necesario que sea un pedazo de tubo, puede ser cualquier otro elemento que usemos para amarrar los extremos y luego poder colgar el biodigestor.



Figura 31: Las cocinas se pueden autoconstruir, acabando la conducción de biogás en tubería de ½” de hierro. De esta manera no hace falta fogón y la llama saldrá directamente de la tubería. Conviene siempre poner dos fogones. En la foto de arriba se ha seguido el esquema básico de un fogón principal y otro secundario, aunque aún falta por hacer la estructura de la cocina. En la segunda foto la cocina ya está funcionando y es de dos fogones equivalentes, dividiendo con una tee la conducción hacia ambas llaves y fogones.

6.6.3.2 Uso del reservorio

El reservorio, como se ha dicho, no solo almacena mayor cantidad de biogás, sino que además permite aumentar la presión. Si se ha estado consumiendo mucho biogás y la llama pierde fuerza en la cocina, se puede amarrar una pita (normalmente liga de neumático) alrededor del reservorio colgado. Jalando de esta liga, se apretará el reservorio, comprimiendo el biogás dentro y aumentará la presión, de manera que saldrá con más fuerza por la cocina. Esta es una de las razones por las que el reservorio tiene que ser accesible y cercano a la cocina.

6.6.4 Cocina e iluminación

La conducción de biogás termina en la cocina, normalmente con dos fogones (hornillas).

Se pueden usar cocinas metálicas típicas de garrafa de butano, simplemente hay que quitar el “difusor de gas”, que se encuentra justo después de la llave de paso. También se puede abrir con una aguja el agujero del difusor hasta ensancharlo para que de buena llama. En cuanto a la mezcla de aire, habrá que cerrarla normalmente. Conectando la tubería de ½” de PCV de conducción de biogás a la cocina, y haciendo los ajustes anteriores, ya se podrá cocinar. Además se ahorrarán parte de los materiales expuestos anteriormente para hacer la cocina.

La cocina se puede construir entera nueva, con tubería de ½” de fierro y codos. Para ello, se lleva la conducción de biogás hasta el lugar donde vaya a estar la cocina y se pone una llave de bola. A partir de ésta, se coloca una ‘tee’ que irá a un fogón por un lado y continuará en tubería de pvc por otro lado, donde se le acaba con otra llave de bola. De esta última llave de bola se continúa con un codo y se va directo al segundo fogón. Los fogones se hacen con tubería de ½” de fierro, el primer tramo a partir de la tee o del codo es de 12-15 cm, se le pone un codo metálico al final y se asciende con otro tramo de 7 cm de tubería de fierro de ½”. Esta salida será el fogón. No hace falta hacer mayores ajustes para la mezcla de aire. Ahora, alrededor de cada fogón hay que hacer una estructura que sustente la olla, para que esta esté a unos 7 cm por encima del final del último tramo de tubería de fierro de ½”. Por supuesto hay que dejar que entre el oxígeno para que haya combustión. Esta estructura se hace en muchos casos en barro y adobe, aunque esto es a gusto de cada de familia.

6.7. Mantenimiento diario y últimos detalles

Instalado ya el biodigestor, se realiza una primera carga de siete carretillas y agua suficiente para tapar las bocas interiores al biodigestor de los tubos de entrada y salida. Tras esto, el segundo día ya será idéntico en mantenimiento a los días sucesivos en la vida del biodigestor (unos 6 a 10 años).

Cada mañana se deberá recoger 20 kg de estiércol fresco y mezclarlos con 60 litros de agua para introducirlos al biodigestor. Esto asegura una producción de biogás de unos 700 a 750 litros al día, suficiente para 4-5 horas de cocina. En el caso de haber diseñado un biodigestor de otras características, habrá que echar la carga de mezcla diaria correspondiente.

Se deberá prestar atención a la válvula de seguridad para que nunca le falte agua, porque de evaporarse

el biogás se escapará y después el biodigestor morirá al entrarle aire. La válvula de seguridad tiene que tener siempre suficiente agua, como para que el tubo éste sumergido de 8 a 13 cm en el agua de la botella de refresco.

Hay que vigilar la condensación de agua en las tuberías de conducción de biogás, ya que de acumularse agua la llama en la cocina sale a “golpes” (suena “po-po-po-po”... y la llama aparece y desaparece) y si no se remedia terminará por no llegar biogás a la cocina. Para ello hay que purgar las tuberías.

Hay que cuidar que ramas o herramientas no estén cerca del biodigestor y cuidar la semisombra, la techumbre o la carpa de invernadero que cubra el biodigestor para un buen mantenimiento. Es importante, en el caso del invernadero, mantenerlo siempre tenso.

Si se puede hay que vallar el biodigestor para evitar que los animales lo dañen (muy típicas son las gallinas) y evitar posible actos de vandalismo o juego entre niños.

Para la carga diaria se puede hacer una “caja de mezcla” a la entrada del biodigestor, de manera que echando el estiércol sobre esa caja (normalmente de barro, o de adobe forrada de plástico) se vaya mezclando con el agua y caiga la mezcla diluida al interior del biodigestor.

Igualmente a la salida, conviene hacer una poza, de un metro de profundidad y de un metro de lado, donde se vaya acumulando el fertilizante. De este pozo puede haber una salida directa que comunique con el canal de riego, si es posible, de los cultivos propios. Esta poza conviene taparla, para que el fertilizante no pierda sus propiedades. Puede taparse con una lámina de madera o metal, aunque también se puede echar paja encima, que flotará, y protegerá al fertilizante de la radiación solar.

7. Nuevas ideas para construcción e instalación de biodigestores

La tecnología de los biodigestores familiares de bajo costo permite seguir desarrollando y mejorando el sistema. Esto no está cerrado, nunca lo ha estado, es una tecnología que se puede y se debe, adaptar a las diferentes situaciones, usos, disponibilidades de material, y hay que seguir haciendo pruebas.

En este punto se plantean algunas ideas a desarrollar, que si alguien se anima y tiene experiencias con ellas, debería de compartir los resultados a través de artículos o internet.

7.1 Ducha de agua caliente por biogás

Antiguamente existían las duchas de alcohol y se puede adaptar un nuevo diseño para que sea con alcohol. El principio es muy sencillo: una llama directa sobre un serpentín de la tubería de agua. Habría que desarrollar el tamaño idóneo de serpentín ya que el biogás tiene menor poder calorífico que el alcohol. El consumo biogás no aumentaría mucho, ya que una ducha no suele durar más de 10 minutos y esto supone unos 26 litros de biogás.

7.2 Producción de electricidad familiar

Existen nuevos motores generadores en el mercado de pequeñas dimensiones, incluso de medio kilowatio. Estos nuevos generadores, cuyo coste ronda los 300 dólares, pueden proveer de electricidad a una familia para usos domésticos. El consumo de esos motores, de ser alimentados con biogás, sería entorno a los 300 litros por hora. Esto implica que para dar tres horas de electricidad al día harían falta 900 litros, que sumados a los 750 estimados para la cocina (y posible ducha), es un total de 1.650 litros de biogás al día. Para generar esa cantidad de biogás sería necesario cargar un biodigestor con 47 kg de estiércol (de vaca) diario.

Esta puede ser una alternativa a las instalaciones familiares fotovoltaicas, de menor coste (sumando biodigestor y generador) y de mayor alcance al añadir gas para cocinar y fertilizante para los cultivos.

7.3 Polietileno normal de carpa solar, protegido del sol

En Bolivia se usa plástico polietileno tubular de 300 micrones color negro humo. Esto es porque parece que el color negro humo aguanta mucho mejor la radiación solar frente al plástico de invernadero comercial. Pero conlleva un problema, que es tener que pedir su fabricación expresa, y esto a veces no resulta fácil.

Como la mayor ventaja del plástico negro es su resistencia al sol, y su desventaja es la falta de disponibilidad en los mercados cotidianamente, se plantea lo siguiente:

Regresar a usar de nuevo el plástico tubular normal de carpa solar, que se puede conseguir en cualquier mercado, evitando la radiación solar para proteger el biodigestor. En el caso del altiplano, donde el biodigestor va dentro de una carpa, se debería de cubrir la campana de gas del biodigestor con telas de sacos viejos, por ejemplo. En el caso del valle, proteger totalmente al biodigestor de la radiación solar con una techumbre y asegurarse que su ubicación esté en una zona soleada. En el caso del trópico, el biodigestor debe estar obligatoriamente en sombra total, con una techumbre de palma por ejemplo. De esta manera, si se protege al biodigestor de la radiación solar en todos los casos, se puede volver a usar el plástico de carpa solar comercial, que es más asequible y en algunos casos más barato. Para el caso de biodigestores en trópico ésta no es ninguna nueva idea, si no más bien es lo que ya se está practicando en todo el mundo.

7.4 Biodigestores para zonas inundables

Existen muchas regiones en el trópico que se inundan cada año, y si no, cada dos o tres años. El trabajo con biodigestores en estas regiones no está restringido, pero se debe considerar tal situación. Por ello hay que diseñar los biodigestores para que aguanten la temporada de inundaciones. Un biodigestor flota y de hecho en regiones de Camboya se instalan los biodigestores flotando en lagunas. Por ello es necesario hacer un almacén exterior al biodigestor que supere la altura media que alcanzan las aguas en épocas de inundación, de igual manera que habrá que asegurar los tubos de entrada y salida con palos verticalmente colocados, que sirvan como guías. El biodigestor flotará manteniendo su posición usando estos palos como raíles y el almacén del perímetro como defensivo de troncos que arrastre la inundación.

7.5 Mayor ganancia de radiación solar en biodigestores de altiplano

Para el caso del altiplano, el invernadero ayuda a que los tapiales laterales ganen calor y de esta manera mantengan en funcionamiento al biodigestor. El plástico negro del biodigestor se va a calentar fuertemente en la parte de la cámara de biogás y esto realmente tiene muy poca incidencia sobre la temperatura del lodo, que está más determinada por la temperatura de su entorno, suelo y tapiales. Para incentivar que los tapiales alcancen mayor temperatura, se podría pintar de negro las paredes interiores a la carpa solar de éstos. De forma que tendrían mayor ganancia de energía solar.

7.6 Conducción de biogás más barata

La conducción de biogás normalmente se hace con tubería de PCV de ½” que se compra por rollos de 100 metros. Esta tubería ha de ser de buena calidad para poder hacer las roscas (tarrajar) en sus extremos. Pero esta buena calidad significa 4 veces más en precio sobre otras tuberías de peor calidad a las que no se las puede hacer rosca. Podría plantearse hacer toda la conducción sin rosca, empleando pegamento de PVC en la uniones, y comprar los accesorios sin rosca. El problema o riesgo es conocer durante cuánto tiempo serán esas uniones herméticas, o si el pegamento

se degradará rápidamente o si no, si el biogás lo hará degradarse. De salir bueno este cambio en materiales, significaría un ahorro, más o menos, de 75 Bolivianos (=9.74\$=6.88 €) por biodigestor.

7.7 Uso de geomembrana y caucho (goma vegetal, jebe)

El precio del petróleo ha subido fuertemente y con ello el de sus derivados, entre ellos el polietileno. De seguir esta escalada de precios, la accesibilidad a la tecnología por parte de las familias será menor. Se pueden hacer biodigestores de geomembrana de 500 micrones de grosor (una sola capa), existen experiencias satisfactorias en Lima (Perú). Pero la geomembrana también depende del petróleo. Otra alternativa podría ser usar el caucho, la goma natural, para hacer el tanque del biodigestor. Su coste actualmente es parecido al polietileno, y se puede pedir hacer un tanque de las dimensiones deseadas, con tela de algodón recubierta de caucho. Lo bueno del caucho es que es natural, tiene mucha durabilidad ante las inclemencias del tiempo, y se pueden pedir las formas deseadas para un tanque o una campana. Sus desventajas son su limitada disponibilidad en el mercado, y solo es accesible en algunas regiones (por ejemplo en el Norte del departamento de La Paz, Bolivia).

7.8 Biodigestores semirrígidos

Dentro de esta idea de costes, y de sustituir el polietileno tubular, otra propuesta puede ser, la construcción de biodigestores semirrígidos. Esto es, la zanja hacerla en cemento o cualquier otro material impermeable y solo emplear plástico para la campana de biogás. El plástico podría ir amarrado a las paredes de la zanja por debajo del nivel del lodo, de forma que el biogás producido no escape. En Costa Rica están teniendo experiencias satisfactorias en este tema, pero los biodigestores ya son alargados como los tubulares. En Perú, se han hecho un par de pruebas con diseño de biodigestores tubulares semirrígidos, pero falta información de los resultados y costes. Es importante mantener la forma alargada para asegurarse que el efluente (el fertilizante) es materia ya digerida.

7.9 Estudio de comercialización del fertilizante producido

El fertilizante producido por el biodigestor, es en muchos casos, el producto más apreciado por las familias. Se producen unos 80 litros de fertilizante diariamente y en muchas ocasiones ésta es una cantidad mayor a la requerida por la familia en sus cultivos. Un valor añadido a tener un biodigestor, podría ser la comercialización de este fertilizante por parte de las familias. En algunos sitios, como Lima (Perú) y Batallas, (La Paz, Bolivia) se tiene experiencia en biodigestores diseñados con la finalidad de producir un buen fertilizante y no tanto biogás, para comercializarlos. Pero en el caso de biodigestores familiares no hay casos relevantes de venta de este fertilizante. El fertilizante sale bastante diluido (porque la mezcla con agua es de 1:3) y debería de poder 'purificarse' para hacerlo más transportable, además de añadirle, quizás, ciertos aditivos (hoja de tabaco, ají, locoto, ceniza, etc.), o una vez extraído del biodigestor volver a meterlo en un turril (barril o recipiente cerrado) para darle mayor tiempo de descomposición, y así seguir mejorándolo. Falta un estudio económico de coste de producción, transporte, precio de venta, valorización, mercados potenciales y aspectos más interesantes, etc.

7.10 Estudio por cultivos de manejo del fertilizante

A raíz del interés por el fertilizante, sería de mucha ayuda disponer de un ‘manual de instrucciones’ de su uso más productivo según cada cultivo. La publicación de este estudio, que se podría ir complementando con nuevas experiencias con otros cultivos, mostraría el mejor uso del fertilizante desde la preparación de la tierra, tratamientos con semillas, tiempos de fumigación, manejos con riego de agua, tiempo de maduración del producto, etc.

7.11 Nuevas materias primas

Este es un tema que está aportando constantemente nuevas experiencias y conocimientos. El empleo de más y nuevas materias primas para alimentar al biodigestor. Estos estudios suelen ser muy locales, y se pueden hacer en laboratorio con análisis químicos y biológicos, o de forma más artesanal. En muchos casos, existen regiones que disponen de otras materias primas que no se conoce su potencial para producir biogás, ni la relación óptima de mezcla de éstos con estiércol. Estas materias primas pueden ser estiércol de otros animales, residuos de producción agrícola o ganadera, plantas locales, frutos, etc. Para estudios artesanales, basta con disponer de tres turriles, o garrafas (o recipientes cerrados). Se llena cada uno con una proporción diferente y ponerles a todo una válvula de seguridad con el tubo interior transparente. Anotando como va aumentando la presión en cada experimento cada día, se tiene una idea de la producción de gas y para evaluar su contenido en metano, basta con ver como es su combustión. De esta manera artesanal básica, se puede evaluar cual es la mejor proporción de mezcla.

8. Bibliografía recomendada y comentada

En esta sección se pretende recoger algunas de las publicaciones más interesantes, así como información que aparece en internet. No están todas las fuentes, pero sí las que se han considerado destacables y han sido útiles en este proceso. La mayoría de ellas, aunque no venga indicada la página web, se pueden encontrar en internet, basta con hacer una búsqueda.

Artículos esenciales en cualquier bibliografía sobre biodigestores tubulares en el que se establecen los principios y la idea original.

Botero Rand Preston T R , 1987 Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manuscrito ineditado: CIPAV, Cali, Colombia. (Castellano). <http://www.utaoundation.org/publications/botero&preston.pdf>

Bui Xuan An, Preston T R and Dolberg F, 1997 The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam. *Livestock Research for Rural Development* (9) 2. (Inglés): <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd9/2/an922.htm>

8.1 Manuales de instalación

Bui Xuan An, Rodríguez L, Sarwatt S V, Preston T R and Dolberg F 1997b Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small-scale farms. *World Animal Review* Number 88 FAO Rome. (Inglés). <http://www.fao.org/ag/AGA/agap/frg/feedback/war/W5256t/W5256t06.htm#TopOfPage>

Lilian Rodríguez and T R Preston, 'Biodigester installation manual'. University of Tropical Agriculture Foundation, Vietnam. (Inglés). <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGAP/FRG/Recycle/biodig/manual.htm>

Francisco X. Aguilar, 2001. 'How to install a polyethylene biogas plant'. (Inglés). <http://crat.africa-web.org/Biogas/technology.htm>

VACVINA 1998 Hybrid Technology Biodigester with Automatic Scum Control (HTASC). Center for Rural Communities. Hanoi, Vietnam. (Inglés). <http://www.agnet.org/library/pt/2004017/>

8.2 Sobre la tecnología

Este es un libro publicado online por la FAO. Contiene toda la información biológica, técnica sobre la digestión anaerobia y los biodigestores en general. Muy completo. (Inglés).

<http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E00.htm#Contents>

Artículo muy completo, con varios datos experimentales y teóricos, sobre los biodigestores (inglés).

San Thy, 2001-2003. 'Management and utilization of biodigestores in integrated farming systems University of Tropical Agriculture Foundation. Camboya. <http://www.mekarn.org/>

Artículo que explica un diseño de biodigestor para que exista mayor mezcla del lodo aprovechando la presión del biogás. (Inglés).

T R Preston and Lylian Rodríguez, 2002, 'Low-cost biodigesters as the epicenter of ecological farming systems'. University of Tropical Agriculture Foundation, Cambodia. <http://www.mekarn.org/procbiod/pres.htm>

En general se puede encontrar una selección de los artículos más relevantes en: <http://www.mekarn.org/publ.htm>

8.3 Experiencia en otros países

Artículos sobre de evaluación de la difusión de la tecnología de biodigestores en Bolivia (castellano).

Marti Herrero J 2007: Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia. *Livestock Research for Rural Development. Volume 19, Article #192.* <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd19/12/mart19192.htm>

Artículo sobre la situación y oportunidades de la tecnología de biodigestores en Sudan (inglés).

David Kuria Njoroge, 2002, 'Evolution of biogas technology in South Sudan; current and future challenges'. UNICEF/OLS, South Sudan. <http://www.mekarn.org/procbiod/pres.htm>

Artículos sobre evaluación de la difusión de la tecnología de biodigestores en Vietnam (inglés).

Bui Xuan An, Thomas R Preston and Frands Dolberg, 1997. "The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam". *Livestock Research for Rural Development 1997, Volume 9, Number 2.* <http://www.fao.org/ag/aGa/agap/FRG/lrrd/lrrd9/2/an92.htm>

Bui Xuan An, 2002. "Biogas technology in developing countries: Vietnam case study". Vietnam. <http://www.mekarn.org/procbiod/an.htm>

Duong Nguyen Khang and Le Minh Tuan, 2002, 'Transferring the low cost plastic' Vietnam. <http://www.mekarn.org/procbiod/khang2.htm>

Bui Van Chinh, Le Viet Ly, Nguyen Huu Tao and Nguyen Giang Phuc, 2002. " Biogas technology transfer in small scale farms in Northern provinces of Vietnam". Vietnam. <http://www.mekarn.org/procbiod/chinh.htm>

Tesis Doctoral sobre la introducción de biodigestores en India (inglés):

Mathias Gustavsson, 2000. " Biogas Technology – Solution in Search of Its Problem: A Study of Small-Scale Rural Technology Introduction and Integration". Suecia. <http://www.he.gu.se>

Artículo sobre de evaluación de la difusión de la tecnología de biodigestores en Filipinas (inglés).

F A Moog, H F Avilla, E V Agpaoa, F G Valenzuela and F C Concepción, 1997. "Promotion and utilization of polyethylene biodigester in smallhold farming systems in the

Philippines.” Filipinas. Livestock Research for Rural Development 1997, Volume 9, Number 2.
<http://www.fao.org/ag/aGa/agap/FRG/lrrd/lrrd9/2/moog92.htm>

Artículo sobre de evaluación de la difusión de la tecnología de biodigestores en Tanzania (inglés).

Lotte Cortsen, Malene Lassen, Helle K.Nielsen, 1995. “Evaluation of Small Scale Biogas Digesters in Turiani, Nronga and Aman, Tanzania”. University of Aarhus, Dinamarca.
<http://www.ardaf.org/NR/rdonlyres/39D9AA2F-7D09-4B0E-B6CE-AC4E858F237C/0/199616LotteCortsen.pdf>

Artículo sobre de evaluación de la difusión de la tecnología de biodigestores en Egipto (en inglés).

Samir El-Shimi and Salah arafa, 1995. “Biogas Technology transfer to rural communities in Egypt”. Egipto.

8.4 Páginas web de interés

CIPAV. Es el Centro de Investigación en Colombia. Ha publicado multitud estudios, y entre sus investigadores se encuentran varios de los mayores especialistas en el tema. <http://www.cipav.org.co>

Livestock Research for Rural Development. Es la revista on-line que mayor cantidad de información uno puede encontrar sobre estudios de biodigestores, a nivel técnico, social, evaluaciones, etc. <http://www.cipav.org.co/lrrd/>

Merkan: En esta página se pueden encontrar artículos on-line seleccionados sobre biodigestores. (Inglés)
<http://www.mekarn.org/>

Paul Harris. Este profesor de la Universidad Adelaide de Australia, ha colgado en su web, también en castellano, muchas informaciones, tanto para principiantes como experimentados en biogás. Muy recomendable (castellano e inglés). <http://www.adelaide.edu.au/biogas/>

UTA: Es la Universidad de Agricultura Tropical, y tiene extensiones en Colombia, Camboya y Venezuela. Han participado en la mayoría de investigaciones relevantes en biodigestores de bajo costo (castellano e inglés). <http://www.utafoundation.org/>

Rural Costa Rica: Grupo de mujeres de Santa Fe, que tienen una información muy completa sobre biodigestores en general, así como su experiencia con biodigestores semirrígidos. Es muy interesante. (castellano e inglés). <http://www.ruralcostarica.com/biogas.html>

8.5 Videos en internet

Muy recomendable el video colgado por la Universidad **EARTH** de Costa Rica. Está dividido en dos partes: (Palabras clave: biogás costa rica)

http://es.youtube.com/watch?v=hjoSNv_plZQ

http://es.youtube.com/watch?v=_EGBedmljM0

Se publicó un video por **GTZ-Energía** sobre la instalación de un biodigestor de altiplano en Bolivia como parte de un taller comunal: (Palabras clave: biogás Bolivia):

<http://es.youtube.com/watch?v=3SI0XEN5Bgo>

BIODIGESTORES FAMILIARES

GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN

Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano

gtz



Co-financiado por el Gobierno
del Reino de los Países Bajos