

Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos

D Poggio*,**, I Ferrer*, Ll Batet* y E Velo*

* *Research Group on Development Cooperation and Human Development (Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano - GRECDH), Technical University of Catalonia (Universitat Politècnica de Catalunya - UPC), Barcelona, Spain*

** *Institute for an Alternative Agriculture (Instituto para una Alternativa Agraria - IAA), Cusco, Peru*
davidepoggio@gmail.com ; ivet.ferrer@upc.edu ; lluis.batet@upc.edu ; enrique.velo@upc.edu

Resumen

En el Altiplano Andino existe una alta demanda de biodigestores por parte de los pequeños productores ganaderos, a causa del escaso acceso a combustibles limpios y a fertilizantes agrícolas, y a la abundancia de residuos agropecuarios. La difusión de biodigestores rurales en zonas rurales montañosas o de clima frío ha sido tradicionalmente escasa. La relación desfavorable entre las bajas temperaturas y la velocidad de la digestión anaeróbica constituye una barrera tecnológica hacia la implementación de biodigestores de bajo coste.

Desde el año 2006, el Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en colaboración con la ONG peruana Instituto para una Alternativa Agraria (IAA), está investigando el desarrollo de biodigestores familiares adaptados a las condiciones extremas del Altiplano Andino ([3000-4500](#) m). En este artículo se describe el proyecto de investigación y los resultados alcanzados.

Palabras clave: biogás, diseño solar pasivo, invernadero, polietileno, PVC

Adaptation of plastic tubular biodigesters to cold climates

Abstract

Farmers in the Andean Plateau strongly demand for household biodigesters due to the lack of clean fuels and agricultural fertilizers, and the abundance of livestock residues. The diffusion of rural biodigesters in cold climate or mountainous rural zones has been traditionally scarce. The unfavorable relationship between low temperatures and the kinetics of biogas production poses a technological barrier to the implementation of low cost biodigesters.

Since 2006, the Research Group on Development Cooperation and Human Development (GRECDH) from the Technical University of Catalonia (UPC), in collaboration with the Peruvian NGO Institute for an Alternative Agriculture (IAA), investigates on the development of household biodigesters adapted to extreme conditions of the Andean Plateau ([3000-4500](#) m). This article describes the research project and its main findings.

Keywords: biogas, greenhouse, passive solar design, polyethylene, PVC

Introducción

Antecedentes de la digestión anaeróbica a baja temperatura

La digestión anaeróbica es una tecnología que permite una gestión sostenible de los residuos orgánicos agropecuarios mediante la conversión de una parte de la materia orgánica en biogás y en un efluente con características apropiadas para su uso como fertilizante y enmienda orgánica. Esta tecnología puede aplicarse tanto en sistemas de ganadería intensiva como en explotaciones a pequeña escala en zonas rurales, sea a nivel colectivo o individual. Durante los últimos cincuenta años se ha conseguido

desarrollar, principalmente en países como China y la India, una tecnología robusta apropiada para zonas rurales ubicadas en climas tropicales y templados. La mayor parte de los digestores instalados durante este período son de tipo cúpula fija (China) y cúpula flotante (India). Recientemente, la tecnología se ha diseminado por otros países, entre los que destaca Nepal (Van Nes 2006). A pesar de todo ello, la difusión de digestores rurales en climas más fríos, o en zonas montañosas, ha tenido menos éxito a causa de la relación desfavorable entre la temperatura y la velocidad del proceso anaeróbico. Recientemente se han llevado a cabo experiencias exitosas en este sentido tanto en zonas rurales como periurbanas (Martí 2007; Ferrer et al 2009).

La velocidad del proceso de digestión y el grado de conversión de biomasa en biogás (producción específica de metano) dependen directamente de la temperatura, puesto que la tasa de crecimiento de las bacterias incrementa con la misma. Así, en el óptimo mesofílico entre 32° y 38 °C (Kashyap et al 2003) el proceso es más rápido que en el rango psicofílico (< 25 °C). Al mismo tiempo, la producción de metano depende de otros parámetros, incluyendo: tipo y cantidad de inóculo, composición y características del sustrato, retención y adaptación de la biomasa bacteriana, y periodicidad de la variación de la temperatura.

Aunque no exista un modelo para predecir la producción de metano en función de la temperatura, como regla de diseño básica puede considerarse que la velocidad de producción de biogás se duplica cada 10 °C de aumento de temperatura en el rango de 15-35 °C (Fulford 1988). Según Wellinger (1999), la velocidad de producción a 22 °C es la mitad respecto a digestores operando a 35° C.

Por otro lado, la biodegradabilidad de la biomasa también aumenta con la temperatura, sobre todo con compuestos recalcitrantes a la hidrólisis como la celulosa. En el caso de la digestión anaerobia psicofílica de estiércol vacuno, y con tiempos de retención razonables (< 100 días), la conversión de sustrato en biogás puede llegar a ser hasta un 30 % inferior respecto al rango mesofílico (Wellinger 1999).

Kishore (1989) elaboró un modelo matemático según el cual la temperatura de equilibrio en un digestor tipo chino (completamente enterrado) estaría dada por la siguiente ecuación:

$$T = 0.217 T_{in} + 0.296 T_a + 0.478 T_g \quad \text{Eq.1}$$

Donde:

T_{in} representa la temperatura del afluente,

T_a la temperatura ambiente y

T_g la temperatura del suelo (que se aproxima a la temperatura del agua subterránea).

En este modelo las condiciones climáticas son preponderantes en determinar la temperatura de equilibrio. A menudo, se desestima la inclusión del calor de reacción anaeróbico debido a que menos del 15% del contenido energético del sustrato alimentado se transforma en calor de reacción (Deublein y Steinheuser 2008), lo que representa una aportación poco significativa respecto a los flujos de calor con el ambiente. Gallert y Winter (2005) reportan un valor del 4.6 % cuando el sustrato es glucosa.

Alvarez et al (2006) reportan una producción de 0.02-0.04 m³ biogás/m³·día como resultado de la digestión de estiércol de vacuno a 11 °C en laboratorio. En una revisión del programa chino de biogás, Daxiong et al (1990) reportan una producción media de biogás de 0.05-0.1 m³/m³·día durante el invierno (6-10 °C). En efecto, la disminución en la cantidad de biogás producida durante los meses fríos es considerable: puede pasar de 1.7 m³/día durante el verano (26 °C) a 0.1 m³/día durante el invierno (12 °C) (Kalia y Singh 1996). En condiciones climáticas como las de la Sierra Andina, la temperatura media anual difícilmente supera los 10 °C (SENAMHI sin fecha). En consecuencia, puede estimarse que un digestor familiar no calentado debería ser de un volumen tal que resultaría inviable económicamente.

En instalaciones industriales a gran escala, el biogás suele utilizarse para calentar los reactores, sea mediante su combustión en calderas, sea en unidades de cogeneración que permiten generar energía eléctrica y aprovechar el calor residual. En cambio, en el caso de instalaciones rurales a pequeña escala,

el biogás se utiliza principalmente como combustible para la cocción de alimentos.

Se han investigado soluciones innovadoras para calentar los digestores, por ejemplo mediante colectores solares (Axaopoulos et al 2001; El-Mashad et al 2004), aunque su coste de inversión y mantenimiento podría resultar insostenible. Por otro lado, también es posible mejorar el funcionamiento de digestores enterrados mediante el uso de invernaderos (Usmani 1996), oscureciendo el terreno para aumentar la absorción solar (Anand y Singh 1993), y pre-calentando la alimentación (Tiwari 1986; Kishore 1989). No obstante, en el caso de condiciones extremas (temperaturas medias $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), estas soluciones podrían no ser suficientes para mantener una producción satisfactoria de biogás, a causa de las pérdidas de calor hacia el suelo a través de las paredes del digestor (Kishor et al 1988).

También se han realizado prototipos de digestores enterrados cubiertos con invernaderos y con paredes aisladas en zonas montañosas de Nepal a 2500 m ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura media anual) (BSP 2003a; BSP 2003b), obteniendo una producción de biogás satisfactoria incluso en los periodos más fríos del año. En este caso, la complicación constructiva y el mayor coste de los materiales utilizados, hasta tres veces superior (BSP 2003a) respecto a un modelo estándar (Bajgain y Shakya 2005), ponen serias limitaciones a la aplicabilidad real de la solución.

En el caso de Perú, las experiencias de implementación de biodigestores en altura llevadas a cabo durante los '80 tuvieron escaso éxito en cuanto a impactos de la tecnología y continuidad del proceso. Actualmente, la mayor parte de los digestores entonces instalados se encuentran en desuso (Spagnoletta 2007). Estas experiencias manifiestan las dificultades típicas de la diseminación de digestores en familias rurales: tecnológicas (falta de diseños adecuados a distintas condiciones climáticas), económicas (inversión difícilmente recuperable en términos monetarios), financieras (dificultad de las familias para financiar la inversión inicial), sociales (necesidad de estimulación de la demanda y apropiación de la tecnología), logísticas (en cuanto a la instalación y seguimiento) y políticas (falta de apoyo a tecnologías para la pequeña producción).

La investigación que aquí se presenta está enfocada principalmente a superar la barrera tecnológica, que es el primer paso para permitir la diseminación de los digestores entre la población, proceso que implica múltiples actores y actividades.

Contexto de Perú en cuanto al manejo de los residuos agropecuarios

Como resultado de la Reforma Agraria de 1969 y de la toma y redistribución de las tierras por la población campesina en las décadas de los años 70 y 80, el panorama agropecuario de Perú está caracterizado actualmente por la pequeña producción familiar, sobre todo en las zonas andinas. Típicamente se integra la cría de animales para la producción de carne, leche y fibras, con la producción de cultivos alimentarios. Los animales se crían en regímenes de semi-estabulación y el estiércol es un recurso abundante. Existen diferentes iniciativas de carácter agroecológico que demuestran que es posible aumentar la productividad de la pequeña producción mediante la optimización de ciertos procesos agro-sistémicos, como el reciclado de los nutrientes, la incorporación de la materia orgánica en el suelo, y el control biológico de plagas (Altieri 1999).

Tradicionalmente, en las zonas andinas el estiércol se usa como abono y como combustible. Así, una parte de las excretas se acumula en el mismo establo durante largos periodos de tiempo, para utilizarse posteriormente en la preparación del terreno en el periodo de pre-siembra. Este tipo de manejo puede conllevar pérdidas importantes de nitrógeno (N) por volatilización, lixiviación, y nitrificación-desnitrificación (Rufino et al 2006). El resto de las excretas, una vez secas (lo que se conoce como *bosta*), se utiliza como combustible para la cocción de alimentos, especialmente en zonas con escasez de leña a causa de la deforestación y de los climas fríos.

En Perú, el 90 % de la población rural recurre a la biomasa como combustible doméstico (Bruce et al 2006): generalmente se utiliza en fogones tradicionales de manera ineficiente, sin chimenea y en ambientes con escasa ventilación. Esto aumenta el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades pulmonares y oculares, y trastornos del embarazo. La Organización Mundial de la Salud (WHO 2007) estima que en Perú la contaminación del aire doméstico debido al humo de las cocinas es responsable de al menos 1500 muertes prematuras al año. Las cenizas residuales de la combustión de la *bosta*

pueden utilizarse como fuente de macro y micro nutrientes, pero la casi totalidad del nitrógeno se volatiliza durante la combustión y el fósforo queda presente en una forma poco soluble (Pels et al 2005).

En este contexto, la digestión anaeróbica se configura como una tecnología con potencial para mejorar el manejo de los residuos animales. En primer lugar, la recolección diaria de las excretas de los establos para alimentar el digestor, disminuye las pérdidas de nutrientes y la contaminación del ambiente.

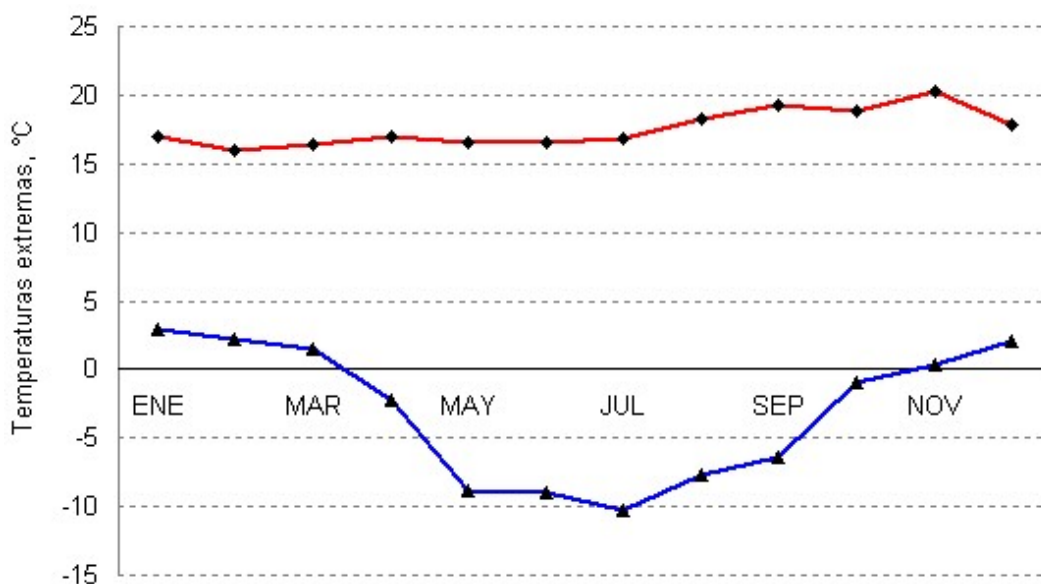
Como producto de la digestión, se obtiene un fertilizante líquido que contiene la misma cantidad de nutrientes presentes en la alimentación. Este fertilizante natural puede aplicarse mediante fertirrigación o fumigación foliar, que permite una asimilación más rápida de los nutrientes por parte de los cultivos en crecimiento. Cabe destacar que también en este caso pueden tener lugar pérdidas importantes de N por volatilización de amoníaco (NH_3), durante las fases de almacenamiento y aplicación (Ortenblad 2000), por lo que es recomendable controlar estos procesos.

Paralelamente se recupera parte del contenido energético de las excretas como biogás. Desde un punto de vista energético, es posible que la combustión directa de la *bosta*, en cocinas mejoradas, sea más eficiente de la conversión anaeróbica y combustión del biogás. Por ejemplo, el estiércol vacuno, que es rico en compuestos escasamente biodegradables como celulosa y lignina, puede presentar una baja biodegradabilidad, de tan solo el 20-30 % (House 1981). Desde el punto de vista sanitario y ambiental, aunque una combustión incompleta del biogás pueda provocar emisiones de gases nocivos para la salud y con efecto invernadero, su impacto es varios órdenes de magnitud inferior al causado por la combustión directa de la biomasa (Smith et al 2000).

Materiales y métodos

Localización del proyecto de investigación

El proyecto de investigación se realizó entre los años 2006 y 2008 en la Microcuenca del Jabón Mayo, situada en la región de Cusco (Perú). La zona se extiende entre los 3900 y 4100 m.s.n.m. y es de clima tipo semiseco y frío, seco en otoño e invierno (australes), con una humedad relativa del aire entre 45-64 % (SENAMHI). La temperatura máxima diaria es aproximadamente constante durante todo el año (18-20 °C), mientras la mínima presenta una pronunciada disminución durante el periodo Mayo-Septiembre (Figura 1), cuando tienen lugar frecuentes fenómenos de heladas durante las noches a causa del cielo despejado y de la escasa humedad.



Datos de la estación meteorológica de Yauri, Espinar. Disponibles en: www.senamhi.gob.pe

Figura 1. Temperaturas mínimas y máximas para la localidad de Yauri, zona adyacente a la zona de investigación y con misma clasificación climática

La irradiación solar es elevada, con un promedio anual de 6.0-6.5 kWh/m²-día (SENAMHI 2003).

Diseño e implementación de biodigestores tubulares

Durante el periodo de investigación, se instalaron 13 digestores familiares de tipo tubular de plástico (Figura 2). El diseño básico originario surgió en Taiwán a finales de los años 60, como respuesta a los problemas que presentaban los digestores en metal u hormigón (altos costes y dificultad técnica en la instalación). El diseño se simplificó posteriormente en proyectos realizados en Etiopía, Colombia y Vietnam por Preston y sus colaboradores (Botero y Preston 1987; Rodríguez y Preston sin fecha). Sobre este diseño se basan las instalaciones realizadas durante el presente proyecto de investigación en Perú.

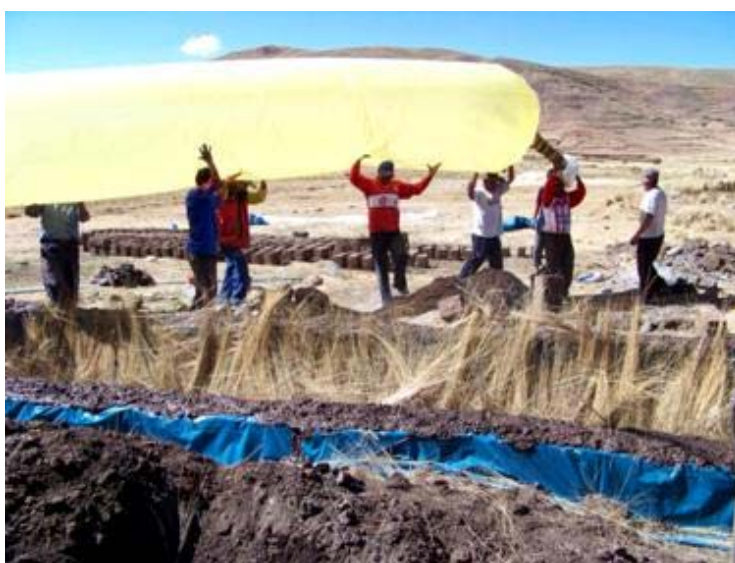


Figura 2. Instalación de un digester tubular de polietileno en la zanja

El sistema está compuesto por un digester tubular situado en una zanja en el terreno, un reservorio de plástico para la acumulación del biogás producido, uno o dos quemadores domésticos y las respectivas tuberías y accesorios para la conducción del gas. El tamaño medio de los digestores instalados es de 6 m³ (volumen líquido útil). Para adaptar el digester tubular a las condiciones climáticas de la zona, se aplicaron criterios de diseño solar pasivo, que permitieran aumentar las ganancias y disminuir las pérdidas de calor.

Aislamiento térmico

Para reducir las pérdidas de calor a través de las paredes de la zanja, se dispone una capa de material aislante de al menos 20 cm, por ejemplo de pasto natural seco y paja de cereales (Figura 3).



Figura 3. Colocación de pasto natural seco como aislante

Es importante que el aislante se apoye sobre una lámina de plástico para evitar que la humedad del terreno acelere la descomposición de los materiales vegetales. Otra opción es la de empacar el aislante en sacos impermeables. Al mismo tiempo, la lámina de plástico impide que crezca pasto u otras plantas en el interior del invernadero. Este aspecto es importante, puesto que la transpiración del pasto podría aumentar considerablemente la humedad dentro del invernadero que al condensar humedecería el aislante, disminuyendo su eficacia.

Invernadero

Una vez colocado el digestor en la zanja aislada, se construye un invernadero que lo recubra por completo (Figura 4), evitando dejar espacios abiertos que permitan el intercambio de aire con el exterior.



Figura 4. Digestor cubierto por invernadero a dos aguas

El invernadero se recubre con polietileno de baja densidad al que se le han incorporado aditivos que aumentan, por un lado, su resistencia a la foto-degradación (filtros de la radiación ultravioleta) y por otro su termicidad (absorbentes de la radiación infrarroja media). La termicidad es la propiedad de un material de retener la radiación infrarroja: el polietileno utilizado en las instalaciones presenta una termicidad del 90%, es decir una transmisión de la radiación infrarroja del 10%.

De este modo, se obtienen las siguientes ventajas:

- Durante las horas de alta radiación solar, se realiza una transferencia neta de calor hacia las capas superficiales del líquido contenido en el digestor. Por conducción, parte del calor se redistribuye en las partes inferiores del digestor.
- Durante las horas nocturnas, disminuyen las pérdidas por radiación desde el digestor hacia el ambiente exterior.
- Disminuye la foto-degradación del plástico del digestor gracias a la reducida radiación UV incidente.
- Disminuyen las pérdidas de calor por convección desde el digestor hacia el aire exterior.
- Se protege el digestor de animales, heladas y granizadas, aumentando su vida útil.

Es posible ubicar el digestor en un invernadero más grande que permita a su vez el cultivo de hortalizas, pero en este caso el digestor alcanzaría una temperatura menor.

Pre-calentamiento de la alimentación

En cada alimentación, la diferencia de temperatura entre influente y efluente provoca una disminución de la energía térmica contenida en el biodigestor. Es posible invertir el fenómeno preparando la alimentación con agua caliente. Con esta finalidad, se puede instalar una tubería de color oscuro dentro del invernadero (Figura 5), que permita almacenar el agua necesaria para la dilución de la alimentación: el agua se pre-calienta absorbiendo la radiación solar e intercambiando calor con el aire caliente.



Figura 5. Tuberías para pre-calentar el agua de dilución

Además, las familias beneficiarias pueden utilizar el agua caliente para fines higiénicos, aumentando así la efectividad de la solución propuesta.

Materiales de construcción

La debilidad del polietileno como material de construcción de los digestores y reservorios limita sus vidas útiles. Como solución alternativa, se han construido 2 digestores y los respectivos reservorios con geomembrana de PVC, termosellada a alta frecuencia (Figura 6).

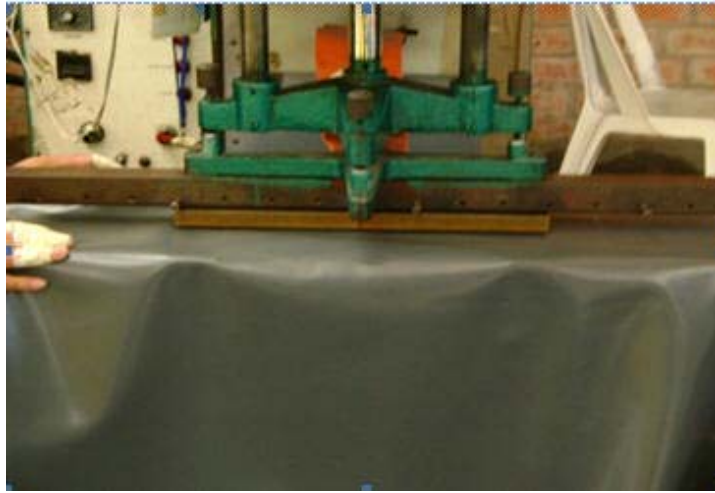


Figura 6. Geomembrana de PVC termosellada para el biodigestor (cortesía de Comercial Industrial Delta S.A.)

El uso de este material presenta las siguientes características y ventajas:

- La membrana de PVC tiene un espesor de lámina de 1 mm y su durabilidad debería ser superior a la membrana de polietileno (0.5 mm totales en caso de biodigestor de doble capa).
- Es posible realizar sencillos parches con pegamiento en las zonas dañadas del plástico. Tal pegamiento no existe para el polietileno, de manera que generalmente la presencia de un hueco implica la reinstalación del digestor.
- El cuerpo del digestor (y del reservorio) se realiza en un taller, equipándolo con las tuberías de carga, descarga y salida del gas. De este modo se simplifican las operaciones de instalación en el campo, reduciendo las posibilidades de error.
- Permite dotar el digestor con más de una salida (y entrada). Los digestores instalados se han provisto de una salida adicional en la parte baja para purgar los sedimentos inertes que se irán acumulando en su interior (Figura 7).



Figura 7. Biodigestor de PVC provisto de doble salida, para el sobrenadante y los sólidos sedimentados

- El sistema puede trabajar a presiones más altas de suministro de gas, gracias a la mayor resistencia a la tensión del PVC.
- Se puede diseñar la sección transversal del digestor para que se adapte a la geometría de la zanja, substituyendo la sección circular por una trapezoidal o rectangular

Resultados y discusión

Evaluación de los biodigestores implementados

Entre los años 2007 y 2008 se instalaron un total de 13 digestores tubulares familiares en la Microcuenca del Jabón Mayo (Perú). A finales del 2008 se evaluó el estado de los digestores y se realizó una encuesta con los usuarios para determinar el nivel de apropiación y satisfacción.

Revisión de los digestores

Se comprobó que el 30 % de los digestores se encontraban en desuso (Tabla 1).

Biodigestores instalados	13 De los cuales de PVC: 2 De polietileno: 11
Biodigestores en desuso	4 (30%) – todos en polietileno
Causa del abandono	Ruptura en el reservorio: 25% Ruptura del invernadero: 25% Desinterés del usuario: 50%

Las causas de abandono incluyen el desinterés del usuario o bien la ruptura y no reparación del sistema. El desinterés del usuario se debe posiblemente al hecho que durante la investigación los usuarios recibían gratuitamente los materiales del digestor, sin aplicar un enfoque de demanda. Para evitarlo, se ha recomendado no subsidiar el 100 % del coste del digestor (Martí 2007). Por otro lado, la ruptura del invernadero, si no se repara de inmediato, permite la entrada de lluvia, disminuyendo la eficacia del aislamiento y del digestor.

Las características de los digestores en funcionamiento se presentan en la Tabla 2. En general se trata de digestores de 6m³ de volumen útil, que trabajan con un tiempo de retención de unos 100 días.

Tabla 2. Características medias de los digestores en funcionamiento. Datos medios de 9 digestores, de los cuales 2 en PVC y 7 en polietileno

Volumen líquido	6 m ³
Alimentación: estiércol vacuno	26 kg/día
Dilución estiércol: agua	1:1 – 62.5 % 1:1.5 – 25 % 1:2 – 12.5 %
Tiempo retención	104 días
Temperatura media diaria ambiental	10.5° C
Temperatura en el interior del digestor*	19.8° C
Consumo de biogás (1 quemador)	3.5 horas/día
Disminución en el consumo de biomasa	56 %

* la temperatura se midió mediante una sonda de temperatura en la parte inferior del digestor

La dilución del estiércol en agua está entorno 1:1 y 1:2. Esta dilución es mucho menor que la recomendada por otros autores (Martí 2008) que es del 1:3 o 1:4; pero en digestores con un tiempo de retención de la mitad (50 días). En la práctica, pues, en ambos casos se está trabajando con las mismas cargas orgánicas, aunque con diferentes caudales de alimentación.

Producción de biogás

La producción de biogás es difícil de medir de manera precisa en este tipo de sistemas que trabajan a bajas presiones. En una fase inicial de la investigación, se obtuvieron valores experimentales de 0.18 m³/m³·día (Poggio 2007). Indirectamente se estima la producción de biogás a partir de las horas de cocción diarias indicadas por los usuarios (en promedio 3.5 h/día). Según este dato, el biogás producido no logra cubrir la totalidad de las necesidades de cocción de los usuarios, aunque permite disminuir en un 50 % el consumo de biomasa (principalmente *bosta*). Cabe considerar que la disponibilidad de

biogás probablemente conlleva un aumento de la cantidad total de energía térmica utilizada (p. ej. calentando agua para fines higiénicos).

Según los encuestados, la producción de gas es aproximadamente constante a lo largo del año, con unos valores máximos durante los meses de octubre-diciembre, gracias al aumento de las temperaturas medias ambientales. Sin embargo, como el periodo más frío del año coincide con el aumento de las horas de radiación solar (SENAMHI 2003), esto evita que la producción de biogás baje considerablemente.

Satisfacción de los usuarios

La mayor parte de los usuarios ha expresado su satisfacción respecto a la tecnología propuesta. Los principales inconvenientes encontrados hacen referencia al nivel de trabajo que requiere la operación del digestor y a la insuficiente cantidad de gas producido. Los aspectos más valorados son la comodidad en la cocción de los alimentos y la mejora del ambiente doméstico (reducción de humos, limpieza de las ollas, etc.). Además, para los que habitualmente compran botellas de gas licuado de petróleo (GLP), su reemplazo por el biogás supone un ahorro monetario.

Comparación de los costes

En cuanto a los costes de inversión, el coste total de los materiales empleados para el digestor de PVC es un 73 % superior respecto al digestor de polietileno (Tabla 3).

Tabla 3. Costos de los materiales

	Coste en nuevos soles (1 sol=0.33 US\$)	
	Digestor PVC	Digestor polietileno
Cuerpo del digestor	977	439
Calentador de agua	102	102
Invernadero	234	234
Tuberías y válvulas para conducción gas	83.0	83
Reservorio de gas	225	25
Quemador	29	29
Pozas de mezcla y efluente	96	96
Total	1746	1008

De todos modos, en la comparación de los costes se debería incorporar la vida útil de cada uno, que todavía no se ha podido determinar.

Discusión

La adaptación de los biodigestores tubulares a las condiciones del Altiplano Andino, mediante las propuestas de diseño expuestas, permite aumentar la temperatura de funcionamiento de los digestores como mínimo unos 10 °C respecto a la temperatura media ambiental. Este es un aspecto fundamental, puesto que a la temperatura ambiente de la zona (con medias < 10 °C) la actividad bacteriana sería mínima, y por consiguiente también la producción de metano.

Sin embargo, el uso del invernadero conlleva oscilaciones térmicas día-noche en la capa superior del líquido del digestor, que en principio podrían ser perjudiciales para la estabilidad del proceso de digestión. Según Alvarez y Liden (2008), la actividad metanogénica es suficientemente robusta como para resistir a variaciones cíclicas diarias de temperatura de hasta 14° C, concentrándose la producción de biogás durante las fases de alta temperatura. Además, las temperaturas elevadas pueden ser útiles para reducir la formación de espumas en la superficie del líquido (House 1981). La diferencia de color entre el PVC (oscuro) y el polietileno (amarillo transparente) parece no tener efectos relevantes sobre la producción de biogás (Pedraza et al 2002). También sería posible aumentar la temperatura del digestor mediante una cobertura móvil nocturna (interna o externa al invernadero), siguiendo el ejemplo de los

invernaderos para cultivos de vegetales (Roberts 1981; Shukla 2006). Este aspecto será objeto de futuras investigaciones, con la finalidad de reducir el tiempo de retención y el volumen del digestor.

La calidad del plástico del invernadero es un punto débil que cabría mejorar. Su ruptura puede causar la degradación del estado del digestor por enfriamiento, entrada de lluvia e incremento de la radiación UV incidente. En este sentido, sería interesante estudiar el uso de coberturas rígidas (policarbonato, paneles corrugados) que aumenten la robustez de la instalación.

En cuanto al plástico del digestor, la geomembrana de PVC podría alargar su vida útil y reducir la probabilidad de que eventuales accidentes conduzcan al abandono del digestor, gracias a la mayor resistencia del material y la posibilidad de sellar escapes mediante parches. Cortsen et al (1996) y Moog et al (1997) reportan abandonos de digestores de polietileno a consecuencia de rupturas en el plástico (por envejecimiento o por animales), debido a la pérdida del gas. De acuerdo con la encuesta de GERES (2005), el 50 % de los digestores visitados estaba inutilizado, principalmente a causa de rupturas del plástico. Por otro lado, pequeñas fugas en los reservorios de gas (ubicados en sitios aireados) son difícilmente detectables y así disminuyen la cantidad de biogás disponible. Los reservorios de PVC pueden reducir estas pérdidas.

Respecto al ciclo de operación, Kalia y Kanwar (1998) aconsejan vaciar un digestor de cúpula fija cada cinco años, para eliminar los inertes y evitar obturaciones. Dado que vaciar un digestor tubular puede ser una tarea delicada, la implementación de una salida adicional para la purga pretende permitir alargar el ciclo de funcionamiento del digestor.

Dentro de los programas de diseminación tecnológica centrados en la capacitación de los usuarios y la apropiación social de la tecnología, con una organización central responsable del seguimiento, es posible esperar que los mismos propietarios realicen las actividades de mantenimiento y reinstalación de digestores y reservorios de plástico (Martí Herrero 2007).

Conclusiones

- Este estudio muestra el potencial de implementación y mejora de la tecnología de los biodigestores tubulares en el contexto del Altiplano Andino. La substitución de combustibles tradicionales (leña y *bosta*) y/o fósiles por biogás conlleva beneficios tanto ambientales como sanitarios para los usuarios. Además, la aplicación agrícola del efluente digerido contribuye a mejorar la calidad de los suelos, cerrando el ciclo de la materia orgánica e incrementando el rendimiento de los cultivos.
- La adaptación de los biodigestores a las condiciones locales dota a las comunidades de una nueva herramienta para el manejo sostenible de los recursos naturales. Cabe señalar que el reciente proceso de descentralización en el Estado Peruano dota a las comunidades locales de importantes recursos financieros que podrán destinarse a la financiación de programas de difusión de la tecnología, siguiendo el enfoque del derecho al acceso a la energía.

Agradecimientos

El proyecto de investigación presentado se llevó a cabo en colaboración con el Instituto por una Alternativa Agraria (IAA), con el financiamiento de la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo (ACCD) y del Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Referencias

Altieri M A 1999 Applying Agroecology to Enhance the Productivity of Peasant Farming System in Latin America, Environment, Development and Sustainability 1: 197–217 <http://www.agroeco.org/doc/LApeasantdev.pdf>

- Alvarez R and Liden G 2008** The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude, *Bioresource Technology* 99: 7278–7284
- Alvarez R, Villca S y Liden G 2006** Biogas production from llama and cow manure at high altitude, *Biomass and Bioenergy* 30: 66–75
- Anand R C and Singh R 1993** A Simple Technique, Charcoal Coating Around the Digester, Improves Biogas Production in Winter, *Bioresource Technology* 45 (2): 151-152
- Axaopoulos P, Panagakis P, Tsavdaris A and Georgakis D 2001** Simulation and experimental performance of a solar heated anaerobic digester, *Solar Energy* 70 (2): 155-164
- Bajgain S and Shakya I 2005** The Nepal Biogas Support Program: A Successful Model of Public Private Partnership for Rural Household Energy Supply, *Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal*
- Botero R y Preston T R 1987** Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas – Manual para su instalación, operación y utilización. Disponible en: <http://www.utaoundation.org/publications/botero&preston.pdf>
- BSP - Biogas Sector Partnership 2003a** Mission Report for the High Altitude Biogas Reactor, Beni VDC, Solukhumbu, Informe preparado por: Khanal K N y Boers W, *Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal*
- BSP - Biogas Sector Partnership 2003b** Construction Options for RABR Remote Area Biogas Reactor, Informe preparado por: Nienhuys N., *Biogas Sector Partnership, Kathmandu, Nepal*
- Bruce N, Rehfuess E, Mehta S, Hutton G and Smith K 2006** Indoor Air Pollution, en: *Disease Control Priorities in Developing Countries (2nd Edition)*, 793-816, Oxford University Press, New York
- Cortsen L, Lassen M and Nielsen K H 1996** Evaluation of Small Scale Biogas Digesters in Turiani, Nronga and Amani, Tanzania, Proceedings of Integrated Farming in Human Development Workshop, ARDAF – Agricultural and Rural Development Advisers' Forum. Disponible en: <http://www.ardaf.org/NR/rdonlyres/39D9AA2F-7D09-4B0E-B6CE-AC4E858F237C/0/199616LotteCortsen.pdf>
- Daxiong Q, Shuhua G, Baofen L and Gehua W 1990** Diffusion and Innovation in the Chinese Biogas Program, *World Development* 18 (4): 555-563
- Deublein D and Steinheuser A 2008** *Biogas from Waste and Renewable Resources*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- El-Mashad H M, van Loon W, Zeeman G, Bot G and Lettinga G 2004** Design of A Solar Thermophilic Anaerobic Reactor for Small Farms, *Biosystems Engineering* 87 (3): 345 - 353
- Ferrer I, Gamiz M, Almeida M, Ruiz A 2009** Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru), *Waste Management* 29(1): 168-173
- Fulford D 1988** *Running a Biogas Programme: A Handbook*, ITDG publishing, London.
- Gallert C and Winter J 2005** Bacterial Metabolism in Wastewater Treatment Systems. In: Jördening H J and Winter J (editors), pp. 1-48, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- GERES 2005** Survey of plastic biogas digesters in Cambodia, informe preparado por: van Mansvelt E R, GERES, Cambodia
- House D 1981** *Biogas Handbook*, Peace Press, Inc. Culver City, California
- Kalia A K and Kanwar S S 1998** Long Term Evaluation of a Fixed Dome Janata Biogas Plant in Hilly Condition, *Bioresource Technology* 65: 61-63
- Kalia A K and Singh S P 1996** Performance evaluation of Pragati & KVIC biogas plant in hilly regions. *Biogas Forum* 64: 6–10
- Kashyap D R, Dadhich K S and Sharma S K 2003** Biomethanation under psychrophilic conditions: a review, *Bioresource Technology* 87: 147-153
- Kishor J, Goyal I C, Sawhney R L, Singh S P, Sodha M S and Dayal M 1988** Solar Assisted Biogas Plants III: Energy Balance of Fixed Dome Biogas Plants and Enhancement of Production in Winters, *International Journal of Energy Research* 12: 711-737

- Kishore V V N 1989** A Heat-Transfer Analysis of Fixed-Dome Biogas Plants, *Biological Wastes* 30: 199-215
- Martí Herrero J 2007** Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia, *Livestock Research for Rural Development* 19: 12. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd19/12/mart19192.htm>
- Martí Herrero J 2008** Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación. Cooperación Técnica Alemana - GTZ. Bolivia. Disponible en: http://www.upc.edu/grecdh/pdf/2008_JMH_Guia_biodigestores.pdf
- Moog F A, Avilla H F, Agpaoa E V, Valenzuela F G and Concepcion F 1997** Promotion and utilization of polyethylene biodigester in smallhold farming systems in the Philippines, *Livestock Research for Rural Development* 9: 2. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd9/2/moog92.htm>
- Ortenblad H 2000** The use of digested slurry within agriculture, AD: Making energy and solving modern waste problems, AD-Nett (editor), Ortenblad H., Herning municipal utilities, Denmark, 53-65
- Pedraza G, Chará J, Conde N, Giraldo S y Giraldo L 2002** Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, *Livestock Research for Rural Development* 14: 1. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd14/1/Pedr141.htm>
- Pels J R, de Nie D S and Kiel H A J 2005** Utilization of Ashes from Biomass Combustion and Gasification, *Proceedings of 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France.*
- Poggio D 2007** Diseño y construcción de dos digestores anaeróbicos en el altiplano andino peruano. Bachelor Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4109/1/Memoria%20PFC.pdf> y <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4109/2/Anexos%20PFC.pdf>
- Roberts V J 1981** Movable Thermal Insulation for Greenhouses, NJAES Research Paper No. P03130-01-81. Disponible en: <http://aesop.rutgers.edu/~horteng/ppt/papers/MovableCurtain.pdf>
- Rodriguez L and Preston T R (sin fecha)** Biodigester installation manual, University of Tropical Agriculture. Disponible en: <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGAP/FRG/Recycle/biodig/manual.htm>
- Rufino M C, Rowe E C, Delve J R and Giller E K 2006** Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 261-282
- SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú** Guía Climática Turística del Perú, SENAMHI, Lima, Perú. Disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0160>
- SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú 2003** Atlas de Energía Solar del Perú, SENAMHI, Lima, Perú.
- Shukla A 2006** Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth-air heat exchanger, *Building and Environment* 41 (7): 843-850
- Smith K R, Uma R, Kishore V V N, Lata K, Joshi V, Zhang J, Rasmussen R A and Khalil M A K 2000** Greenhouses Gases from Small-scale Combustion Devices in Developing Countries-Phase IIa, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington DC. Disponible en: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r00052/600r00052.htm>
- Spagnoletta S A 2007** Viability study for the application of small-size biodigesters in the Andean rural zone of Cajamarca (Peru), MSc. Thesis, Loughborough University. Disponible en: <http://www.upc.edu/grecdh/pdf/Spagnoletta%20Sebastiano%20Alessandro%20-%20Viability%20study%20for%20the%20application%20of%20small-size%20biodigesters%20in%20the%20Andean%20rural%20zone%20of%20Cajamarca-Peru.pdf>
- Tiwari G N 1986** Transient analysis of a biogas system integrated with a solar waste heater. *Renewable Energy Review* 8: 67-73
- Usmani J A 1996** Performance characteristic of a greenhouse integrated biogas system, *Energy Conversion Management* 37 (9): 1423-1433
- Van Nes W J 2006** Asia hits the gas. *Renewable Energy World* 9 (1): 102-111
- Wellinger A 1999** Process design of agricultural digesters, Nova Energie GmbH, Ettenhausen, disponible en: <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d14prdgn.pdf>
- WHO - World Health Organization 2007** Indoor Air Pollution: National Burden of Disease Estimates, World Health Organization, Francia. Disponible en: http://www.who.int/entity/indoorair/publications/indoor_air_national_burden_estimate_revised.pdf

Received 6 June 2009; Accepted 10 July 2009; Published 1 September 2009

[Go to top](#)