

# Potencial de los biodigestores de bajo costo o “Low-Tech”: soluciones de ingeniería y perspectivas para una mayor eficiencia

Estudio de caso



Jaime Martí Herrero<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Biomass to Resources Group, Universidad Regional Amazonica Ikiam, Vía Tena-Muyuna, Km.7, Tena, Napo, Ecuador

<sup>2</sup>Building Energy and Environment Group, Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria, Terrassa, Barcelona, Spain

jaime.marti@ikiam.edu.ec

## Resumen

Este artículo presenta una revisión de los biodigestores de bajo costo o baja tecnología y sus soluciones de ingeniería para mejorar la accesibilidad y eficiencia en el contexto de la digestión anaerobia. Se resalta la importancia de la comprensión profunda de los sistemas y procesos involucrados y su fácil adaptación a condiciones psicrófilas, en contraposición a la idea errónea de que la digestión anaerobia difícilmente puede ocurrir a temperaturas por debajo de 25 °C. Se destaca el papel de los consorcios microbianos psicrotróficos y su efectividad en la producción de biogás a temperaturas más bajas. Se analizan estrategias de ingeniería como la agitación neumática, la sumersión forzada, la calefacción solar pasiva y el desarrollo de biofilm para mejorar el rendimiento de los biodigestores de bajo costo. Este artículo desafía la idea de que los biodigestores de bajo costo o baja tecnología son inferiores.

### Palabras clave:

Biodigestores; Bajo costo; Condiciones psicrófilas; Biogás; Consorcios microbianos; Digestión anaerobia; Calentamiento solar.

## Potential of Low-Cost or 'Low Tech' Biodigesters: Engineering Solutions and Perspectives for Enhanced Efficiency

### Abstract

This article presents a review of low-cost or low-tech digesters and their engineering solutions to enhance accessibility and efficiency in the context of anaerobic digestion. The importance of understanding and adapting to psychrophilic conditions is emphasized, challenging the misconception that anaerobic digestion is unlikely to occur at temperatures below 25 °C. The role of psychrotrophic microbial consortia and their effectiveness in biogas production at lower temperatures is highlighted. Engineering strategies such as pneumatic agitation, passive solar heating, and biofilm development are analyzed to improve the performance of low-cost digesters. This article challenges the notion that low-cost or low-tech digesters are inferior, emphasizing that their design requires a profound understanding of the systems and processes involved.

### Keywords:

Digesters; Low-cost; Psychrophilic conditions; Biogas; Microbial consortia; Anaerobic digestion; Solar heating.

**Forma de citar:** Martí Herrero, J. M. (2023). Potencial de los biodigestores de bajo costo o “Low-Tech”: soluciones de ingeniería y perspectivas para una mayor eficiencia. RedBioLAC, 7, 4-11.

## Introducción

En el libro “lo pequeño es Hermoso” [Schumacher \(2011\)](#) propone el concepto de “tecnología intermedia”, él decía:

“A pesar de que estamos en posesión de todo el conocimiento necesario, todavía se necesita un esfuerzo sistemático y creativo para introducir esta tecnología dentro de la existencia activa y hacerla disponible en forma general. De acuerdo con mi propia experiencia es bastante más difícil volver a la línea correcta y a la simplicidad que avanzar en la dirección de una mayor sofisticación y complejidad. Cualquier ingeniero o investigador de tercera categoría podría incrementar la complejidad, pero se requiere un conocimiento real y profundo para poder hacer las cosas simples otra vez. Y este conocimiento profundo no lo obtiene fácilmente la gente que se ha dejado llevar a un estado de alienación del trabajo real y productivo y del sistema de autoequilibrio de la naturaleza y que nunca reconoce la medida y la limitación. Cualquier actividad que deja de reconocer un principio de autolimitación deviene demoníaca. En nuestro trabajo con los países en desarrollo estamos forzados a reconocer las limitaciones de la pobreza y ésta puede ser una escala saludable para todos nosotros en la cual, mientras tratamos genuinamente de ayudar a otros, podemos ganar también conocimiento y experiencia para ayudarnos a nosotros mismos”.

Para entender y poder reivindicar los biodigestores de bajo costo es importante entender esta idea de “simplicidad” y “autolimitación”. En un reciente artículo publicado por [Tavera-Ruiz et al. \(2023\)](#) se realiza una exhaustiva revisión del sector de los biodigestores en Colombia. En este los autores hicieron un censo de biodigestores y encontraron que el 79 % son de bajo costo, trabajan sin calefacción y mayoritariamente son biodigestores tubulares. Al igual que en el resto de Latinoamérica, los biodigestores tubulares son la tecnología más extendida ([Garfi et al., 2016](#)). En otros continentes como África ([Kemausuor et al., 2018](#)) y Asia ([Song et al., 2014](#); [Patinvoh & Taherzadeh, 2019](#)) la tecnología de biogás más común es la de biodigestores de domo fijo con cámara de compensación, conocido como modelo CAMARTEC ([Sasse et al., 1991](#)) por ser este centro de investigación de Tanzania el que lo promocionó a partir de modelos de domo fijo previos.

La clave de todos estos modelos de biodigestores es que se caracterizan por ser de “baja tecnología” o “bajo coste” (“low tech” o “Low cost” en inglés), es decir, que no requieren de sistemas de calefacción o agitación activos ([Martí-Herrero, 2011](#)), recogiendo la idea de simplicidad de Schumacher. Cuando se dice “bajo coste”, o “baja tecnología”, en muchos ámbitos se consideran propuestas ingenieriles menores, incluso me han llegado a decir “para pobres”.

Al final, la tecnología de bajo coste o baja tecnología conlleva a tener que conocer en profundidad los sistemas con los que se trabaja y los fenómenos que ocurren, ya que al final, el objetivo es simplificar la tecnología el máximo para hacerla accesible al mayor número de personas. En

general la prioridad de las tecnologías de bajo costo es la accesibilidad frente a la eficiencia.

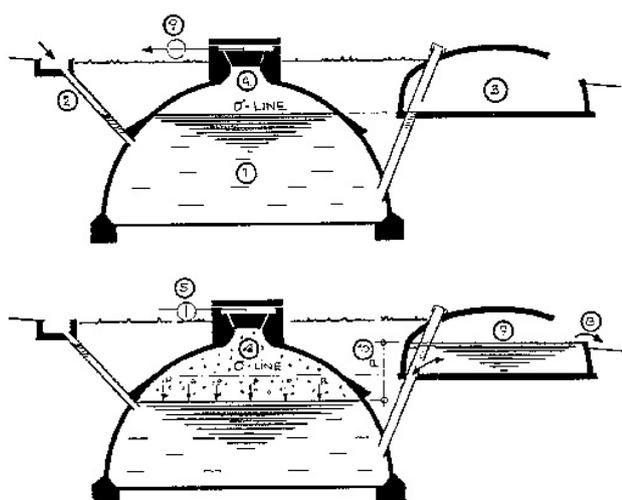
A continuación, se describen las simplificaciones que se han incorporado a la tecnología de los biodigestores de bajo coste como son: evitar agitación externa, pretratamiento y calefacción externa y estrategias de ingeniería que hacen más accesible la tecnología. Además, se revisan los malentendidos que generan los resultados obtenidos en laboratorio, cuando se trabaja en digestión anaerobia en condiciones psicofílicas, que no reflejan la realidad del funcionamiento de los biodigestores de bajo costo.

### Agitar biodigestores sin usar energía externa

A mis estudiantes de la asignatura de Biorreactores de la carrera de Biotecnología de la Universidad Regional Amazónica Ikiam en Ecuador, los familiarizo con el mundo de los biodigestores tras haber revisado las ecuaciones generales de los biorreactores. Siempre que presento el modelo CAMARTEC, lo destaco como ejemplo de un tipo de ingeniería sublime. Esto debido a que este modelo se basa en tener dos cámaras: una principal donde ocurre la reacción anaerobia y se produce y acumula el biogás en la cúpula, y una otra cámara secundaria abierta al exterior, correspondiente a la salida del efluente ([Figura 1](#)). Hay que considerar que si los biodigestores tubulares suelen trabajar a 5 % de sólidos totales en la carga, y de ahí es que se mezcla 1:3, 1:4 o más, estiércol:agua ([Martí-Herrero, 2019](#)); los biodigestores CAMARTEC trabajan a 10 % de sólidos totales, es decir, solo requieren de 1 parte de agua por cada parte de estiércol que se agrega. Esto es una gran ventaja de los biodigestores tipo CAMARTEC ya que no se requiere tanta agua para hacer funcionar, y por tanto se adapta muy bien a lugares con problemas hídricos.

En estas circunstancias, el lodo dentro del biodigestor es mucho más espeso que en el biodigestor tubular, y se podrían esperar problemas de formación de “costra” en el reactor, así como de sedimentación en el fondo de este, lo que reduciría el volumen útil, y por ende el tiempo de retención. Sin embargo, son justo estos dos aspectos (la formación de la costra y la sedimentación) los que han sido solucionados con una verdadera ingeniería a través de un buen diseño.

En un modelo CAMARTEC el nivel del lodo interior varía su altura (sube y baja) dependiendo de la cantidad de biogás acumulado en la cúpula. Cuando la presión del biogás aumenta, el lodo en la primera cámara es empujado hacia abajo y crea espacio para el biogás, mientras que cuando el biogás es consumido, baja la presión en la cúpula, y el lodo recupera su nivel de equilibrio. Este “sube y baja” implica que, en caso de estar formándose una costra en la superficie del lodo, esta no puede consolidarse debido a los constantes cambios del área de la superficie por la forma semiesférica de la cúpula. Esta es la primera solución.



**Figura 1** | Esquema de un biodigestor CAMARTEC donde arriba se muestra la situación cuando la presión de biogás acumulada en la cúpula es baja, y abajo, cuando la presión del biogás ha aumentado, produciendo un desplazamiento del lodo hacia la cámara de compensación (Sasse *et al.*, 1991).

La segunda solución para evitar la sedimentación también se debe al movimiento de “sube-baja” del lodo producido por la presión del biogás acumulado en la cúpula. Durante ese proceso, en el que el lodo baja de nivel en la primera cámara, un volumen similar de lodo es desplazado hacia la segunda cámara, llamada cámara de compensación. Ahora bien, cuando se consume el biogás y la presión de este disminuye, todo el volumen de lodo desplazado previamente a la cámara secundaria retorna a ocupar la primera cámara. De este modo se produce una agitación del lodo aprovechando la presión del biogás, sin necesitar de motores, bombeo, ni ningún tipo de energía externa. Es una agitación neumática.

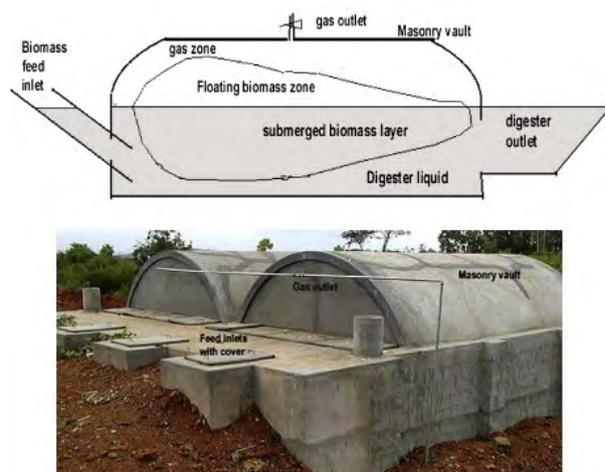
Es por esta razón que considero al modelo CAMARTEC como una referencia de la buena ingeniería, ya que se aprovechan los propios fenómenos que suceden en el sistema para producir agitación.

### Evitar la necesidad de pretratar y generar biofilm

Otros ejemplos de buena ingeniería se encuentran en la India, donde Chanakya *et al.* (2009a) presentaron un biodigestor de sumersión forzada (Figura 2). Este cuenta con una cúpula generosa, pero que no está pensada para el almacenamiento de biogás, sino de “costra”, o sea, permitir la acumulación de sólidos flotantes en la superficie. Con esta “costra” formada, el nuevo material con el que se alimenta el biodigestor queda completamente sumergido y su degradación es más rápida. Esto es interesante para sustratos con alto contenido de lignocelulosa (cascaras de frutas, restos de poda, etc.), que de otra forma flotarían, quedando parcialmente sumergidos, ralentizando su degradación. La

biomasa sumergida se convierte en superficie idónea para ser colonizada por biofilm y así ayudar a su degradación.

Chanakya *et al.* (2009b) en sus publicaciones muestran cómo se puede trabajar, incluso con restos de poda de árboles o residuos de mercado, sin necesidad de pretratamiento (típicamente trituración). Incentivar el desarrollo de biofilm dentro del biodigestor ya fue evaluado en biodigestores tubulares de clima frío en Bolivia, esto implicó la introducción de botellas plásticas de refresco cortadas en su interior, y se obtuvo un 50 % más de biogás, en comparación a cuando no hay botellas (Martí-Herrero *et al.*, 2014). Estas botellas cortadas sirven como soporte para el desarrollo de biofilm, pero también como filtro para retener sólidos e incrementar el tiempo de retención de los sólidos, pero el fenómeno principal es el desarrollo de biofilm como se demostró en el estudio llevado a cabo con biodigestores tubulares y aguas residuales de mataderos en Bolivia (Martí-Herrero *et al.*, 2018).



**Figura 2** | En la parte superior se observa el esquema del biodigestor de tres zonas propuesto por Chanakya, y en la inferior su implementación real. La biomasa flotante cerca de la entrada sirve para mantener abajo la biomasa recién alimentada y funciona como una zona de pretratamiento durante la cual el flujo de ácidos volátiles de fermentación (VFA) se difunde en el líquido del digestor para convertirse en biogás. A medida que el tiempo de retención avanza, la biomasa vegetal a menudo es colonizada en gran medida por metanógenos. La foto de abajo muestra biodigestores con este diseño que son capaces de tratar 0,5 toneladas por días de residuos orgánicos (Chanakya *et al.*, 2009a).

Posteriormente, la propuesta de sumersión de Chanakya fue aplicada en el biodigestor conocido como “Frankenstein” en Bolivia, donde durante dos años se estuvo produciendo biogás a partir de residuos orgánicos de mercado sin pretratamiento alguno, forzando la sumersión completa del sustrato al bajar la altura del techo de la cúpula por debajo del nivel del agua (Martí-Herrero *et al.*, 2019).

## Entendiendo la psicofilia y los problemas del laboratorio

Otro aspecto suele ser la calefacción de los biodigestores. En el sector del biogás de los países desarrollados (países europeos, Canadá, Estados Unidos de América) se da por hecho que la digestión anaerobia solo se puede trabajar a 35 – 37 °C (en rango mesofílico) o incrementar la temperatura hasta el rango termofílico (> 45 °C). Con estas mismas creencias también regresan algunos científicos latinoamericanos que han desarrollado sus doctorados o postgrados en Europa. Trabajar a temperaturas menores a 25 °C es sistemáticamente ignorado en esos sectores del biogás y en los *reviews* (artículos de revisión del estado del arte). Un ejemplo de esto es el estudio de [Li et al. \(2019\)](#); incluso he escuchado afirmar que “por debajo de 35 °C no hay digestión anaerobia”. Esta falta de conocimiento resulta sorprendente si se toma en cuenta que el 99% de los biodigestores del mundo trabajan por debajo de los 25 °C, y solo el 1% de los biodigestores trabajan con calefacción. Los consorcios de microorganismos que degradan materia en condiciones anaerobias, no solo se encuentran en los sistemas digestivos de los animales, sino también en pantanos, humedales y lagunas, y no importa si es la Amazonía, alta montaña o Alaska ([Walker et al., 2007](#)). Siempre se encuentran consorcios de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica y producir biogás. Incluso a temperaturas cercanas a la congelación. [Petropoulos et al. \(2021\)](#) mostraron que se puede producir biogás a temperaturas tan bajas como 4 °C. Este hallazgo debería ser un indicador claro de que se puede trabajar a temperaturas por debajo de los 25 °C.

Los ensayos en laboratorio ayudan a entender la interacción entre los diferentes parámetros, el aspecto que menos gusta evaluar es el tiempo. ¿Por qué? Porque investigar cómo evolucionan los sistemas a mediano o largo plazo lleva tiempo. Y en la academia lo que se premia es publicar rápido y mucho (*publish or perish*), por lo que los ensayos cortos suelen ser los preferidos. El ensayo más típico en los laboratorios es el de Potencial de Biometano (PBM, o BMP por sus siglas en inglés) ([Holliger et al., 2016](#)). El protocolo dice que este ensayo hay que realizarlo a 35 °C y permite tener una estimación de cuál es el potencial de biogás de una materia orgánica concreta. Este ensayo se tarda en realizar, en general, hasta 30 o 40 días y eso ya se considera mucho tiempo. Un problema que surge con estos ensayos BMP es cuando han sido utilizados para evaluar la producción a temperaturas menores. En estos casos, como ya se mencionó, en la publicación de [Martí-Herrero et al. \(2022\)](#), hay dos factores claves que no se suelen considerar (y ambos implican tiempo):

- El consorcio de microorganismos que se va a usar, ya debe estar adaptado a la temperatura a la que se quiere realizar en ensayo BMP (otro tema es cómo hacer esta adaptación) como ya proponía [Zeeman et al. \(1988\)](#). Si no se adapta el inoculo cuando se trabaja a temperaturas menores, lo que

se va a medir es “cómo afecta el shock térmico a un inoculo acostumbrado a trabajar a 35 °C cuando de repente les pones a trabajar a 20, o 15 °C”.

- Por otro lado, cuando se desarrollan estos ensayos, en muchos casos se evita prolongar el tiempo de medición más allá de los 30 o 40 días. Es conocido que la temperatura afecta la velocidad de la reacción, generalmente disminuyendo a temperaturas más bajas y, por lo tanto, prolongando el tiempo necesario para la misma reacción. Es decir, que como ya mostraron [Safley & Westerman \(1990\)](#), se puede producir la misma cantidad de biogás a temperaturas más bajas, pero esto requiere de más tiempo. A pesar de esto, en la literatura se encuentran ensayos BMP paralelos realizados a 37 °C y a otras temperaturas menores, donde la medición se detiene a los 20 días ([Chae et al., 2008](#)). Esto limita la medición de los ensayos a temperaturas más bajas, ya que se puede requerir de más tiempo para obtener sus resultados.

Todo este tipo de trabajo de laboratorio “rápido”, donde no se considera la aclimatación a la temperatura del ensayo del consorcio de microorganismos, o se cortan la medición en los ensayos a temperaturas más frías, ha retroalimentado esta creencia en que “la digestión anaerobia psicrófila no vale la pena”.

Cuando se han realizado mediciones de los biodigestores reales instalados en granjas, funcionando en condiciones psicrófilas, se ha encontrado producciones de biogás mucho más altas de lo estimado en laboratorio. [Jaime-Estévez et al. \(2020\)](#) reportaron los resultados de monitoreo de un biodigestor tubular instalado en una granja porcícola en Colombia, que llevaba operando 8 años a una temperatura media de 17,7 °C, y encontraron que la producción de biogás era similar (SBP 0,40 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgSV) a la esperada a 36,5 °C medida en laboratorio en un ensayo BPM ([Kafle y Chen, 2016](#)).

La clave está en la adaptación del consorcio metanogénico a las temperaturas frías. [Martí-Herrero et al. \(2022\)](#) muestran cómo un inoculo adaptado a 15 °C produce más biogás que, incluso, cuando se le aumenta la temperatura a 25 o 35 °C. Es más, la cantidad de biogás producido a 15 °C es similar a la producida a 35 °C por un consorcio adaptado, esto corrobora, desde el laboratorio, los resultados de [Jaime-Estévez et al. \(2020\)](#).

Esto nos ayuda a entender el hecho de que [Akindolire et al. \(2022\)](#) recientemente hayan publicado un *review* sobre la digestión anaerobia psicrófila donde se reporta un nuevo grupo de consorcio de microorganismos anaerobios, los psicrotrofos, que se suman a los termófilos, los mesófilos y los psicrófilos (**Figura 3**). Estos psicrotrofos tienen su temperatura óptima de crecimiento superior a partir de los 20 °C, mientras que para los psicrófilos clásicos la temperatura óptima es inferior a 20 °C ([Gounot, 1986](#)). Son estos microorganismos psicrotrofos los que pueden explicar los buenos resultados en la producción de biogás

de los millones de biodigestores de bajo costo operando en el mundo. Llama la atención que este resaca del grupo psicrótrófico suceda en 2022, cuando ya en los años 80s se estaba hablando de ellos (Reichardt y Morita, 1982).

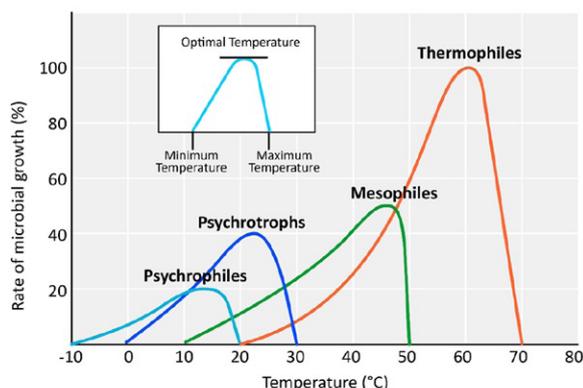


Figura 3 | La tasa de crecimiento relativa de microorganismos psicrófilos, psicrótrópicos, mesófilos y termófilos en respuesta a la temperatura, extraído de (Akindolire et al., 2022).

### Calentar los biodigestores aprovechando el Sol

Para aumentar la temperatura de los biodigestores y tratar de aumentar la rapidez de la reacción (y disminuir el tiempo de retención y por tanto el volumen de reactor necesario) es necesario inyectar calor al lodo. En cualquier caso, siempre que se haga esto es necesario aislar al biodigestor para no perder ese calor aportado.

El calor puede provenir del calor residual producido en un generador/motor alimentado con biogás, de modo que mediante un intercambiador de calor se eleva la temperatura del lodo. Pero esto implica que se va a usar el biogás como combustible en un motor/generador, que el H<sub>2</sub>S del biogás va a ser filtrado y que se dispone de un intercambiador de calor y una bomba para aprovechar el calor residual. Ambas condiciones no suelen darse cuando se trabaja en pequeños y medianos sistemas.

Otra fuente de calor es adicionar al biodigestor paneles térmicos solares de modo que se calienta agua y se usa como fluido calefactor que se hace circular por el interior del biodigestor. Esta combinación ya se estudió por Gupta et al. (1988) en un domo fijo, pero vuelve a la actualidad con ensayos recientes como el de Li et al. (2022) y Krause et al. (2022). En cualquier caso, los paneles térmicos solares son costosos, y si no se encuentran instalados por debajo del nivel del biodigestor para poder aprovechar el flujo convectivo del fluido que transporta el calor, será necesario una bomba para poder circular el agua caliente, de nuevo complicando el sistema. Gaballah et al. (2020) comparan dos biodigestores tubulares, ambos dentro de un invernadero sencillo, y donde uno tiene aislante en el suelo y está conectado a un colector solar y el otro no tiene aislante ni fuente de calefacción externa. Los resultados son interesantes, pues al cabo de dos meses de monitoreo la diferencia de temperatura del lodo de cada biodigestor

es de unos 3 °C a favor del biodigestor con colector solar conectado, pero al final del monitoreo la producción de biogás viene a ser la misma en ambos sistemas. En este punto entra la adaptación de los consorcios metanogénicos a las diferentes temperaturas, como ya se comentó anteriormente.

Otra opción es precalentar el agua que se va a usar en la carga a través de colectores solares, que pueden ser construidos de forma muy sencilla. Por ejemplo, Sasse (1988) propuso precalentar el agua con que se va a mezclar el estiércol, en la propia caja de mezcla, cubriéndola con un vidrio o superficie translúcida, como se muestra en la Figura 4. Lo que el autor no comenta en sus publicaciones es la necesidad de aislar el biodigestor siempre que se realice cualquier tipo de precalentamiento o calentamiento directo del biodigestor. De no usarse aislante en el biodigestor, la ganancia de calor por el precalentamiento de la carga será perdida rápidamente y no se notará aumento de temperatura interior.

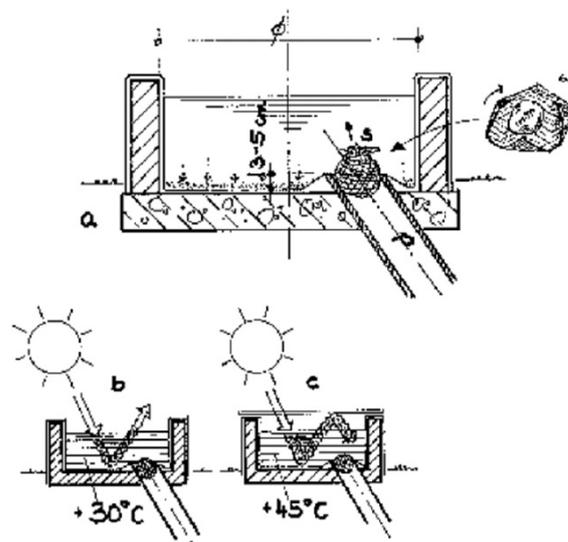


Figura 4 | Esquema de precalentamiento en la propia caja de mezcla antes de ingresar al biodigestor, y dice “La arena y las piedras se asientan en el fondo del tanque de mezcla. Por esta razón, el tubo de entrada (p) debe estar 3-5 cm más alto que el fondo del tanque. Una forma redonda y cilíndrica es la más económica y la mejor para el tanque de mezcla. Si el tanque se llena por la mañana y luego se cubre, la mezcla se calienta bajo el sol hasta la tarde (c). Solo entonces se retira el tapón (s)” extraído de Sasse (1988). La figura (a) muestra el esquema general donde se aprecia el tubo de entrada (p) al biodigestor tapado para retener el agua en tanque. La figura (b) y (c) muestran que la diferencia entre cubrir, o no, el tanque con un material transparente repercute calentamiento del agua.

Otra alternativa al precalentamiento del agua que se va a usar en la mezcla de carga al biodigestor es la propuesta por Poggio et al. (2009), en su trabajo con biodigestores tubulares plásticos en clima frío desarrollado en Cuzco (Perú). Estos autores usaron aislante en zanja y un invernadero compacto (similar a los usados en Bolivia, con muros de adobe (Martí-Herrero et al., 2014), pero en su caso de dos aguas) y añadieron una tubería negra que sirve de eje para sostener la división de las dos aguas del invernadero,

como colector solar de agua. De esta forma integraron el precalentamiento en la propia estructura del invernadero. Es importante, en este punto, remarcar que, tanto en Bolivia como en Perú, durante la primera década del siglo XXI se usó 10 cm de paja como aislante en anja, pero experiencias posteriores mostraron que este aislante orgánico al final no cumplía su función, debido a su degradación al cabo de dos años.

Finalmente, la opción más viable, a mi parecer, es convertir el propio biodigestor en un colector térmico solar. Así no hacen falta sistemas externos acoplados. El mismo biodigestor se diseña para captar radiación solar y almacenarla (Martí-Herrero, 2019). En este caso se usan materiales de colores oscuros para el reactor. Si no se dispone de geomembranas de colores oscuros, se puede poner a modo de sábana, un material oscuro sobre la cúpula del biodigestor. Estos colores oscuros absorben mejor la radiación solar e incrementan la temperatura (la geomembrana alcanza hasta los 50 y 60 °C) y parte del calor es transferido al lodo mediante convección (a través del biogás) y radiación entre la cúpula y el lodo. Considerando aislante y color negro se pueden llegar a incrementos en la temperatura del lodo entre 4 y 6 °C respecto a la temperatura media ambiental. Este es un incremento importante, pues permite que en regiones con temperatura media anual de 15 °C, se pueda trabajar dentro del biodigestor a temperaturas en torno a 20 °C, que como ya se dijo, es donde trabajan los consorcios psicrotróficos. Si se quiere mejorar el comportamiento, como última medida, se puede incorporar un invernadero que cubra el biodigestor, cuanto más compacto sea este mejor. En este caso, sumando el color negro más el aislante, más el invernadero, se puede llegar hasta incrementos de temperatura del lodo de 10 °C por encima de la temperatura media ambiental.

## Conclusiones

Los biodigestores de bajo costo, o baja tecnología, son los más implementados en el mundo. Su enfoque es el de hacer más accesible la tecnología, por encima de la eficiencia. En muchos ámbitos del sector del biogás, principalmente el proveniente de los países desarrollados, estas tecnologías están invisibilizadas o vistas como menores, frente a los biodigestores sofisticados e industrializados. En parte, esto se debe a la falta de entendimiento de la digestión anaerobia en condiciones psicrofilas, y a los malentendidos que se generan al interpretar los resultados de laboratorio, refutados por los resultados obtenidos en biodigestor de bajo costo reales. La agitación neumática, el diseño de calefacción solar pasivo, el incentivo al desarrollo de biofilm, y la adaptación de los consorcios son estrategias sencillas ingenieriles simples que mejoran la tecnología y la hacen más accesible a la población mundial que dispone de residuos orgánicos, principalmente pequeños y medianos productores agropecuarios. La ingeniería que hay detrás de

estos biodigestores de bajo costo o baja tecnología implica un conocimiento profundo de los sistemas que, a pesar de los límites económicos y materiales, o quizás debido a ellos, demuestra una creatividad y adaptación a la realidad que otras aproximaciones no hacen.

## Referencias

- Akindolire, M. A., Rama, H., & Roopnarain, A. (2022). Psychrophilic anaerobic digestion: A critical evaluation of microorganisms and enzymes to drive the process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112394>
- Chae, K. J., Jang, A. M., Yim, S. K., & Kim, I. S. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource technology*, 99(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>
- Chanakya H. N., Reddy B. V. V., & Modak, J. (2009a) Biomethanation of herbaceous biomass residues using 3-zone plug flow like digester: A case study from India, *Renewable Energy*, 34(2), 416e420. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.003>
- Chanakya, H. N., Sharma, I., & Ramachandra, T. V. (2009b). Micro-scale anaerobic digestion of point source components of organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 29(4), 1306-1312. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.09.014>
- Gaballah, E. S., Abdelkader, T. K., Luo, S., Yuan, Q., & Abomohra, A. E. F. (2020). Enhancement of biogas production by integrated solar heating system: A pilot study using tubular digester. *Energy*, 193, 116758. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116758>
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
- Gounot, A. M. (1986). Psychrophilic and psychrotrophic microorganisms. *Experientia*, 42, 1192-1197. <https://doi.org/10.1007/BF01946390>
- Gupta, R. A., Rai, S. N., & Tiwari, G. N. (1988). An improved solar assisted biogas plant (fixed dome type): A transient analysis. *Energy conversion and management*, 28(1), 53-57. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90011-8)

- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Jaimes-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., ... & Escalante Hernández, H. (2020). Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: Complete performance evaluation and microbiological population. *Energies*, 14(1), 151. <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Kafle, G. K., & Chen, L. (2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste management*, 48, 492-502. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.021>
- Kemausuor, F., Adaramola, M.S., Morken, J. (2018). A review of commercial biogas systems and lessons for Africa. *Energies*, 11, 2984. <https://doi.org/10.3390/en11112984>
- Krause, M. J., Detwiler, N., Schwarber, A., & McCauley, M. (2022). An evaluation of solar thermal heating to support a freeze-thaw anaerobic digestion system for human waste treatment in subarctic environments. *Renewable Energy*, 198, 618-625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.055>
- Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied energy*, 240, 120-137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Li, J., Jin, S., Wan, D., Li, H., Gong, S., & Novakovic, V. (2022). Feasibility of annual dry anaerobic digestion temperature-controlled by solar energy in cold and arid areas. *Journal of Environmental Management*, 318, 115626. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115626>
- Martí-Herrero, J. (2011). Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: two issues. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4481-4484. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.020>
- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Rojas, M. R., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, 167, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.115>
- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., & Flores, T. (2018). Evaluation of the low technology tubular digesters in the production of biogas from slaughterhouse wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 199, 633-642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.148>
- Martí-Herrero J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación. WISIOS-REDBIOLAC. Ecuador. <https://www.beegroup-cimne.com/biodigestores-tubulares-guia-de-diseno-y-manual-de-instalacion/>
- Martí-Herrero, J., Soria-Castellón, G., Diaz-de-Basurto, A., Alvarez, R., & Chemisana, D. (2019). Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 133, 676-684. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.030>
- Martí-Herrero, J., Castro, L., Jaimes-Estévez, J., Grijalva, M., Gualatoña, M., Aldás, M. B., & Escalante, H. (2022). Biomethane potential test applied to psychrophilic conditions: Three issues about inoculum temperature adaptation. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101279. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101279>
- Patinvoh, R. J., Taherzadeh, M. J. (2019). Challenges of biogas implementation in developing countries. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.006>
- Petropoulos, E., Shamurad, B., Tabraiz, S., Yu, Y., Davenport, R., Curtis, T. P., & Dolfing, J. (2021). Sewage treatment at 4° C in anaerobic upflow reactors with and without a membrane—performance, function and microbial diversity. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(1), 156-171. <https://doi.org/10.1039/D0EW00753F>
- Poggio, D., Ferrer Martí, I., Batet Miracle, L., & Velo García, E. (2009). Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos. *Livestock research for rural development*, 21(9), 1-14
- Reichardt, W., & Morita, R. Y. (1982). Temperature characteristics of psychrotrophic and psychrophilic bacteria. *Microbiology*, 128(3), 565-568. <https://doi.org/10.1099/00221287-128-3-565>
- Safley Jr, L. M., & Westerman, P. W. (1990). Psychrophilic anaerobic digestion of animal manure: proposed design methodology. *Biological Wastes*, 34(2), 133-148. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(90\)90014-J](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90014-J)

- Sasse, L., Kellner, C., & Kimaro, A. (1991). Improved biogas unit for developing countries. Vieweg and Sohn, Germany. Available at: [https://energypedia.info/wiki/Improved\\_Biogas\\_Unit\\_for\\_Developing\\_Countries](https://energypedia.info/wiki/Improved_Biogas_Unit_for_Developing_Countries)
- Sasse, L. (1988). Biogas plants. Vieweg & Sohn. Wiesbaden. Available at: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1799#>
- Schumacher, E. F. (2011). Lo pequeño es hermoso (Vol. 7). Ediciones Akal. [https://www.akal.com/libro/lo-pequeno-es-hermoso\\_34584/](https://www.akal.com/libro/lo-pequeno-es-hermoso_34584/)
- Song, Z., Zhang, C., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2014). Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.084>
- Tavera-Ruiz, C., Martí-Herrero, J., Mendieta, O., Jaimes-Estévez, J., Gauthier-Maradei, P., Azimov, U., ... & Castro, L. (2023). Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113097. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113097>
- Walter, K. M., Smith, L. C., & Stuart Chapin III, F. (2007). Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1856), 1657-1676. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2036>
- Zeeman, G., Sutter, K., Vens, T., Koster, M., & Wellinger, A. (1988). Psychrophilic digestion of dairy cattle and pig manure: start-up procedures of batch, fed-batch and CSTR-type digesters. *Biological wastes*, 26(1), 15-31. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(88\)90146-2](https://doi.org/10.1016/0269-7483(88)90146-2)