

Resumen

Durante el periodo noviembre 2005 - abril 2006 se desarrolló una investigación para adaptar la tecnología de la digestión anaeróbica a las condiciones de la zona alta de la sierra peruana. La expectativa es de aprovechar de manera eficiente los residuos producidos por la actividad pecuaria, que representa la principal actividad económica de la zona. El uso actual de los excrementos animales es como combustible doméstico (bosta) para la cocción de alimentos. Esta práctica presenta consecuencias que pueden considerarse negativas: el esfuerzo y el tiempo necesarios a la recolección y preparación del combustible; el ambiente insalubre que se crea en los hogares al quemar la biomasa de manera ineficiente en estufas rudimentales; el progresivo empobrecimiento del suelo a causa de la continua remoción de nutrientes y materia orgánica. La conversión anaeróbica de los excrementos animales representa la posibilidad de producir energía limpia (biogás) y recircular los nutrientes (biol) al mismo tiempo, con ahorro de trabajo por parte de los usuarios.

Algunas características dificultan la transferencia tecnológica. La temperatura media anual de la zona (8° - 10° C) impide de hecho la producción de biogás en un digestor no calentado. La economía de subsistencia de la mayoría de los pobladores limita el coste inicial del digestor. La solución propuesta en este trabajo consiste en la construcción de un digestor tubular de polietileno (PTD) calentado mediante invernadero. El PTD es el digestor rural con el menor coste de instalación, el invernadero permite aprovechar la elevada radiación solar de la zona. Se realizaron dos digestores de tamaño familiar y se observó su funcionamiento durante dos meses. La producción de gas ($0.18 \text{ m}^3 \text{ biogás/m}^3 \text{ digestor/día}$) es comparable con experiencias análogas en otras partes del mundo. Con este valor de productividad la instalación podría ser económicamente beneficiosa en el caso el biogás sustituya al GPL como combustible doméstico (payback 2 años y 8 meses). En los casos de sustitución de la bosta el análisis económico no sirve, y la eventual difusión sería guiada por las elecciones de la comunidad.

El diseño presenta pero posibilidades de mejoramiento que deben ser investigadas: durada de los materiales, mejor eficiencia del invernadero, optimización de los parámetros de digestión, eficiencia del quemador. También hay que investigar usos alternativos del biol (crianza peces y algas) y aumentar la integración del sistema agrícola. Este documento quiere servir como base para este ulterior desarrollo, y entonces se presentan también algunas informaciones generales sobre los argumentos precedentes. Durante la investigación se preparó un manual para la instalación del PTD que se presenta en los anexos.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
PREFACIO	5
INTRODUCCIÓN	7
1. ENERGÍA Y DESARROLLO EN LA SIERRA PERUANA	9
1.1. Marco geográfico	9
1.2. Las actividades del IAA	10
1.3. Necesidades energéticas	14
1.3.1 Consecuencias del uso doméstico de la biomasa	15
1.4. La digestión anaeróbica como solución energética	16
1.4.1. Más que energía: sistemas integrados	16
1.4.2. Límites a la difusión del digestor	19
1.5. Adaptación de la tecnología	21
2. BIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	23
2.1. La digestión anaeróbica en la naturaleza	23
2.1.1. Digestión anaeróbica en el rumen	24
2.2. Microbiología de la digestión anaeróbica	26
2.3. Parámetros físico-químicos de la digestión anaeróbica	31
2.3.1. Temperatura del sustrato	32
2.3.2. pH del sustrato	33
2.3.3. Relación carbono/nitrógeno	34
2.3.4. Nutrientes y toxicidad	35
3. TECNOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	37
3.1. Digestor tubular de plástico	37
3.1.1. Características del digestor tubular	39
3.2. Mecanismos de la degradación del LDPE	46
3.3. Almacenamiento del biogás	51
3.4. Seguridad de la instalación	52
4. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL ALTIPLANO	55
4.1. Influencia de la temperatura y de la radiación solar	56
4.2. Calentamiento del PTD a través de un invernadero	62



4.3. Operación del digestor tubular	66
4.3.1. Productividad del sustrato.....	67
4.3.2. Tasa de alimentación del digestor	72
4.3.3. Dimensionamiento del digestor.....	74
4.3.4. Start up del digestor	75
5. USO DEL BIOGÁS	79
5.1. Características de la combustión del biogás	80
5.2. Dimensionamiento de un quemador de biogás.....	83
6. DETALLES DEL TRABAJO DE CAMPO	91
6.1 Elección de los sitios para la instalación del PTD	91
6.2. Digestor en la comunidad de Chollocani	92
6.3. Digestor en la comunidad de Pabellones	98
7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	103
7.1. Eficacia de los PTD.....	103
7.2. Métodos para aumentar la productividad del PTD	105
7.3. Eficiencia de los quemadores realizados	107
7.4. Análisis económico de los PTD realizados.....	108
7.4.1. Análisis coste-beneficio del digestor de Chollocani	109
8. IMPACTO AMBIENTAL DE LAS INSTALACIONES REALIZADAS	113
9. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN	115
CONCLUSIONES	117
BIBLIOGRAFÍA	119

ANEXO A. MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL DIGESTOR TUBULAR DE PLÁSTICO

ANEXO B. MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO EN EL CASO DE DIGESTORES RURALES



Prefacio

Este proyecto nace en el seno de la cooperación entre el Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y el Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Tal colaboración empezó en el año 2004, dando un nuevo impulso a los proyectos de cooperación que se venían impulsando desde el Centre de Cooperació per al Desenvolupament (CCD) de la UPC con el GRUPO de la PUCP. El objetivo de la cooperación entre el INTE y el GRUPO es impulsar:

- Movilidad de profesores y estudiantes en ambos sentidos
- Realización de tesis de grado por parte de estudiantes de la UPC sobre temas de interés para el GRUPO
- Desplazamiento de estudiantes de la UPC al Perú para colaborar con el GRUPO, preferentemente en la puesta en marcha de los proyectos desarrollados como tesis de grado

En el Septiembre del 2005 inició mi colaboración con el GRUPO con el objetivo de profundizar el conocimiento de las energías renovables y las tecnologías apropiadas para el mundo rural. En aquel periodo el GRUPO estaba realizando un proyecto en colaboración con el Instituto para una Alternativa Agraria (IAA), una ONG peruana con sede en Cusco. Finalidad de esta colaboración era, como se entiende del mismo nombre del proyecto, la “Investigación estratégica de procesos y equipos; desarrollo y implementación para la transferencia de tecnologías apropiadas con uso de energía renovable para las comunidades de la microcuenca de Jabón Mayo, Cusco”. Dentro de los equipos que se entendían investigar, figuraba un digestor anaeróbico. Las líneas generales del proyecto GRUPO-IAA no precisaban las características del digestor a investigarse y solo fijaban la cantidad de dinero destinada a las actividades investigativas. Miguel Hadzich, director del GRUPO, aceptó que fuera yo a realizar dicha investigación. Las actividades realizadas abarcaron el periodo Noviembre 2005 – Abril 2006, incluyendo: estudio teórico de la digestión anaeróbica, visita de la zona, diseño, construcción y monitoreo de dos digestores. Los gastos para el desplazamiento a Perú fueron cubiertos por el Centro de Cooperación y Desarrollo (CCD) de la UPC. Los gastos relativos a la realización de los digestores anaeróbicos fueron cubiertos por el GRUPO y el IAA.

La presente memoria resume las actividades desarrolladas en Perú durante la investigación, integrándolas con unas informaciones generales sobre la tecnología realizada. Hay el deseo que este documento pueda servir como base para seguir la investigación de esta prometedora tecnología.





Introducción

Se presentan las actividades de investigación que se han llevado a cabo en la alta sierra peruana para adaptar la digestión anaeróbica a las condiciones climáticas y económicas de esta zona. La investigación se desarrolló con escasez de medios y de personal y no puede definirse rigurosa. Se construyeron dos digestores tubulares de plástico, protegidos y calentados con invernaderos. Su funcionamiento se observó durante dos meses.

Medir y aumentar la producción de biogás representó el objetivo principal de la investigación.





1. Energía y desarrollo en la sierra peruana

1.1. Marco geográfico

El trabajo de campo se desarrolló en la microcuenca de Jabón Mayo, lugar en el cual el IAA concentra sus actividades de desarrollo agropecuario, productivo y social. La microcuenca está ubicada en la provincia de Canas, región del Cusco, se extiende sobre 11600 hectáreas, entre 3800 y 4500 metros de altitud, y comprende los distritos de Yanaoca, Pampamarca y Túpac Amaru. Antes de depositar sus aguas en la laguna de Tungasuna, el río Jabón Mayo recorre por 19 km la microcuenca. 1800 familias, reunidas en 11 comunidades campesinas, viven en la microcuenca (fuente: IAA, documento no publicado). La sierra peruana es lejos de ser una zona climáticamente y ecológicamente homogénea. A menudo se divide la sierra peruana en pisos ecológicos, cada uno con características peculiares que influyen las actividades económicas típicas de la sierra rural: agricultura, ganadería y transformación de los productos asociados. La microcuenca pertenece a la zona alta de la sierra (> 4000 metros), caracterizada por bajas temperatura (3° - 10° C, media anual) y largos periodos de sequía (mayo-octubre) (fuente: IAA, documento no publicado). En este tipo de zona, las tierras, mayormente pastizales, tradicionalmente se dedican a la crianza del ganado y a la producción en seco de cultivos, como papa, oca y otros cereales andinos destinados, principalmente, al autoconsumo. También se crían gallinas y cuyes. Se desempeñan pequeños comercios y oficios artesanales (cerámicas, tejas, carpintería, textiles...), que tienen importancia en diferenciar las varias comunidades.



Ilustración 1-1 En el círculo, la microcuenca de Jabón Mayo





Ilustración 1-2 Foto satelitaria de la microcuenca de Jabón Mayo (en verde al centro)

Agricultura y ganadería son las actividades principales pero difícilmente permiten una producción superior al autoconsumo. Uno de los factores que explican la baja producción, la baja productividad, la baja o nula rentabilidad y por tanto las condiciones de atraso y pobreza de los pequeños productores comuneros en las zonas altas de la sierra, es la falta de conocimientos y la falta de capacitación en tecnologías y la falta de condiciones económicas para implementar tecnologías.

1.2. Las actividades del IAA

Debido a las actividades que el IAA, en colaboración con la federación campesina, ha ido desarrollando en los últimos 15 años, la microcuenca se ha vuelto un laboratorio de nuevas prácticas agropecuarias que la transforman en un caso raro en el panorama de las otras zonas altas de la sierra, debido a nuevas practicas agropecuarias y de educación del campesinado que han resultado en una mejor calidad de vida de parte de los pobladores.

La experiencia en la microcuenca Jabón Mayo está basada bajo una concepción integral que articula la gestión predial de la familia comunera, con la gestión comunal y la gestión de la microcuenca. Al tomar la microcuenca como un ámbito de planificación y ejecución de acciones, no se elimina la finca de este proceso. La finca sigue siendo la unidad primaria de toma de decisión en el medio rural y toda acción que se planifica es efectivamente implementada a este nivel. Lo anterior implica que todo lo que se planifica a nivel de la



microcuenca necesita estar coordinado con lo que planifica cada productor/a individualmente, a nivel de su finca o parcela de producción.

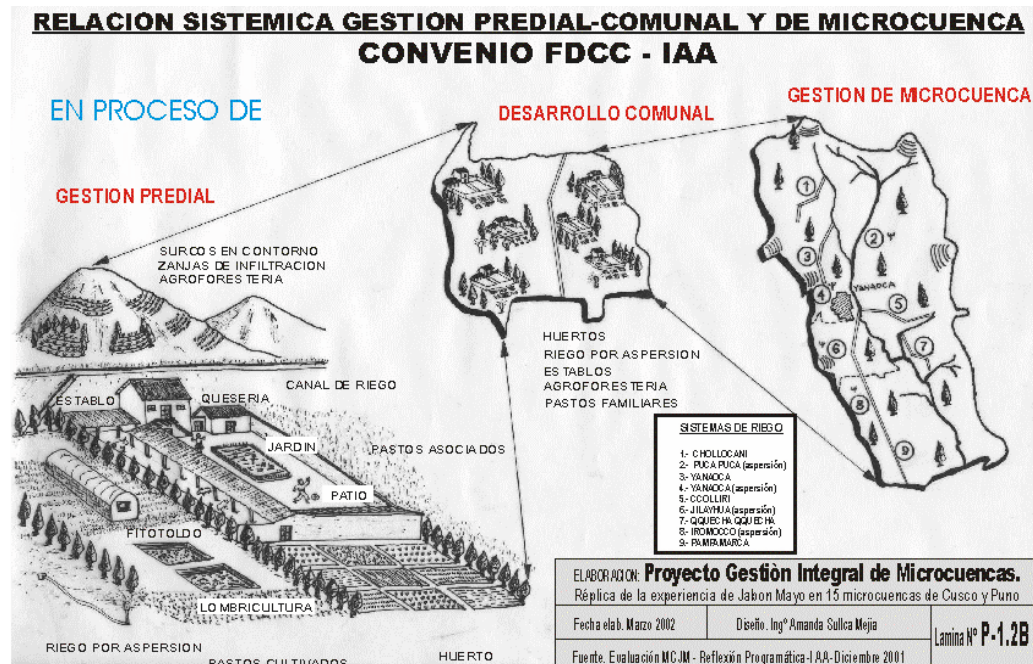


Ilustración 1-3 Gestión integral de microcuencas y diferentes escalas de intervención.

La actividad del IAA se articula a través de diferentes acciones y líneas de desarrollo, integrando en cada momento el avance tecnológico con el aspecto organizativo:

- Capacitación tecnológica e implementación de tecnologías.
- Participación con toma de decisiones.
- Educación productiva emprendedora.
- Calidad y competitividad.
- Investigación aplicada in situ.

En particular algunas prácticas tecnológicas han sido particularmente exitosas en cambiar los hábitos tradicionales de la zona:

- riego orientado al cultivo de pastos asociados para la crianza de ganado;
- huerto familiar fijo como entrada para integrar la alimentación tradicional;
- transformación de los productos agropecuarios, así de aumentar su valor añadido;



- mejora de la dieta diaria a través de colaboración con escuelas y mediante centros de seguridad alimentaria comunales.

“La capacitación tecnológica e implementación de tecnologías produce cambios en corto tiempo logrando una mejora de la alimentación y la calidad nutricional a través del autoconsumo y por otro lado, permite el incremento sustantivo de ingresos monetarios. Se han validado 40 tecnologías productivas, conservacionistas y de transformación. La tecnología motor del cambio es el riego por aspersión a partir de variadas fuentes de agua como manantes, puquiales, ojos de agua y aguas de filtración.

Quienes engordaban ganado una vez al año ahora pueden hacerlo 4 veces al año, algunos más emprendedores hasta 6 veces al año. Quienes han optado por criar cuyes tienen ventas semanales. Quienes crían ganado lechero tienen ventas diarias de leche fresca, yogurt y manjar blanco. Quienes hacen transformación de hortalizas, tubérculos y carne venden frecuentemente mermeladas, néctar, encurtidos y jamón.

La transformación en industrias artesanales familiares está permitiendo que las familias experimenten la importancia de generar valor agregado y gozar de la diferencia que hay en los precios, comparados cuando venden materia prima barata. Están surgiendo temas de acopio de leche que se pasteuriza [...]. También lo están abasteciendo con yogurt y queso. Es decir, empieza a surgir un aparato embrionario de industrialización de la pequeña producción campesina con beneficio directo de los productores, distinto al agroindustria que se basa en gran industria localizada en grandes zonas urbanas que procesan materia barata proveniente de pequeños productores campesinos.”[1]

El enfoque de las estrategias del IAA para impulsar el desarrollo de la zona se resume en la “escalera del progreso” **[Ilustración 1-4]**: los eslabones son los avances tecnológicos y el desarrollo gradual de capacidades, la baranda es lo que opera transversalmente integrando la tecnología con la instrucción, la salud, el mercado y las instituciones, etc., y el soporte es la organización democrática y participada.

Jabón Mayo es el laboratorio de estas prácticas, donde se prueban y se validan tecnologías. El segundo momento es constituido por la difusión del conocimiento a otras comunidades alejadas de la sierra. La difusión está basada sobre la capacitación campesino a campesino, enseñamiento principalmente práctico fundado sobre el “aprender haciendo”: es un sistema de difusión en red, horizontal. Los “portadores” de información son los Yachachiq (líderes tecnológicos), que desarrollan una especie de servicio civil voluntario. Cada Yachachiq está a cargo de un cierto número de familias (10-20). El Yachachiq recibe periódicamente capacitación en una nueva tecnología, y se compromete a transferirla a las familias que están a su cargo. Las familias así reciben un apoyo y una educación tecnológica directa, ya que el Yachachiq es su vecino. Luego el círculo de la información se sierra, con reuniones de los Yachachiq que discuten de las experiencias, dificultades y éxitos tenidos. La tecnología original, exógena, transmitida al



comienzo con capacitación ingeniero-campesino se ha hibridado con los saberes tradicionales, con el conocimiento del territorio de las familias campesinas. La evolución tecnológica es dejada en manos de los usuarios, y la rapidez de la evolución es propiciada por la actividad de los Yachachiq [2].

Otro mecanismo utilizado es un mecanismo espectacular, de visión directa de los resultados conseguidos en Jabón Mayo. Periódicamente el IAA organiza pasantías que ofrecen la oportunidad a representantes de otras comunidades de conocer las tecnologías que se están implementando, dialogar con las familias en sus predios y saber como lo hicieron.

“Esta relación, a más de aportar conocimientos, se convierte en un reto para el visitante que reflexiona diciendo: “si esta familia que es campesina como la mía, lo hace, por qué nosotros no lo vamos a hacer, incluso estamos a una menor altitud”, lo que abre condiciones firmes a favor de la réplica. La familia replicante parte elaborando su diseño predial mediante un dibujo de su predio con todos sus recursos y la distribución que posee. Luego dibuja su predio de cómo transformar lo implementando las tecnologías que ha conocido y que más se acomodan a sus habilidades y expectativas. El plan predial aporta en un gran cambio en la cultura del campesino andino dominada por el temor al riesgo –que los mantiene en una precaria línea defensiva de sobrevivencia – cambiándolos hacia una actitud emprendedora.”[1]





Ilustración 1-4 Conjunto de acciones para promover el desarrollo humano en la zona rural andina (fuente: IAA, documento no publicado).

1.3. Necesidades energéticas

La posibilidad de mejorar la capacidad productiva y transformadora del campesinado es limitada por una escasa disponibilidad de recursos energéticos. El uso de energía para labores agropecuarias es prácticamente nulo, y la única ayuda deriva de burros para el transporte: la mayor parte de los trabajos son realizadas con la sola fuerza humana.

La mayoría de las familias de las comunidades campesinas que se han visitado durante el trabajo de campo, usa bosta como combustible. Esta es integrada con residuos vegetales y arbustos que se coleccionan en las laderas contiguas a la comunidad. Las pocas unidades productivas que están dando el salto a tener un manejo empresarial a través de la transformación de buena parte de su producción, intentan utilizar combustibles como GPL, kerosén, y electricidad, que deben ser comprados en el poblado principal: esto les permite una mayor producción pero a la vez incrementa costos afectando su capacidad competitiva. La presencia de bosques y manchas arbóreas es limitadísima a las alturas de estas zonas.



1.3.1 Consecuencias del uso doméstico de la biomasa

En las zonas altoandinas, como es Jabón Mayo, debido al clima hay naturalmente poca oferta de leña y otros productos forestales, por lo que en estas zonas los campesinos utilizan el estiércol del ganado para cocinar sus alimentos. Esta práctica tiene unas importantes consecuencias sociales, económicas, medioambientales que pueden considerarse negativas, y que en buena parte son las mismas de cualquier uso ineficiente e insostenible de biomasa [3].

Sociales. La bosta se prepara con los excrementos que se encuentran en el establo del predio y sobretodo en los pastizales. Dependiendo de la geografía de la zona y de los hábitos familiares, los excrementos son recolectados diariamente, durante y al final de los trabajos agropecuarios (trabajos en la chacra y pastoreo del ganado) o sino mediante unos viajes una dos veces a la semana, que con el auxilio de un burro permiten recolectar grandes cantidades. Después en el predio se completa el secado al sol de los excrementos, que finalmente son almacenados. Las cantidades almacenadas son generalmente mínimas, y siempre permanece el sentimiento de precariedad de que de un día al otro podría acabarse el combustible. Resumiendo la preparación de la bosta es una práctica rutinaria, fatigosa y que necesita gran cantidades de tiempo.

Medioambientales. El utilizzo extensivo de la bosta causa una gradual disminución de la fertilidad de los campos. En práctica se interrumpe el reciclo natural de los minerales y de los nutrientes, orgánicos e inorgánicos, necesarios a mantener fértil y sano un cualquier suelo. Los pocos arbustos y árboles existentes se utilizan por encima de su capacidad de crecimiento, causando su ulterior disminución. La combustión ineficiente (10-15%) e incompleta en estufa rudimentales (tres piedras o de adobe) libera a la atmósfera gases contaminantes de efecto invernadero.

Sanitarias. La bosta es quemada de manera ineficiente, con fuego abierto en el hogar y de todas maneras sin chimeneas. Además, sobre todo en las zonas andinas por razones climáticas, los ambientes donde se cocina tienen una mínima ventilación. La consecuencia es una exposición al humo para las personas presentes en ellos, y que en la mayoría de los casos son las mujeres que se dedican a la preparación de los alimentos, incluso para 4-5 horas diarias. Los niveles de exposición a las substancias tóxicas en la combustión de biomasa superan en diez, veinte o más veces los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud [4]. Esto causa que un gran número de personas sufra de enfermedades respiratorias, cáncer, trastornos del embarazo. Es una de las causas de la alta mortalidad infantil.



1.4. La digestión anaeróbica como solución energética

Difícilmente en el futuro las poblaciones rurales tendrán mayor acceso a las fuentes energéticas “modernas” como GPL, gas natural, kerosén a causa de sus escasos insumos y de los altos precios de estos combustibles (y que van aumentando). La biomasa y la energía solar quedan como únicas soluciones posibles como fuentes de energía térmica doméstica.

El uso de la biomasa puede ser grandemente mejorado mediante la adopción de cocinas mejoradas [4], que aumentan la eficiencia de la combustión hasta a un 30% disminuyendo la cantidad de combustible empleado, y reducen la exposición a los humos tóxicos. En el caso de las zonas altas pero no resuelve del todo la necesidad de recolectar y preparar la bosta y mantiene el problema de la disminución de fertilidad de los suelos.

Las cocinas solares tienen una gran ventaja en las zonas altas a causa de la elevada radiación solar disponible. Los problemas más grandes son de tipo cultural, ya que ofrecen un tipo de cocción adaptado solo para algunos alimentos y necesita de ritmos y tiempos diferentes respecto una cocina a combustión.

Una tercera solución es ofrecida por la digestión anaeróbica con producción de biogás, que permite una cocción de los alimentos mediante combustión eliminando del todo los problemas relativos a la emisión de sustancias tóxicas en el hogar. Los excrementos pueden ser utilizados directamente sin necesidad de pretratamiento. No es pero una solución universal, ya que presenta unas características que limitan su difusión a la población. Potencialmente pero puede ser la respuesta óptima para algunos casos.

1.4.1. Más que energía: sistemas integrados

La instalación de un digestor puede ser la ocasión para la creación de un sistema integrado agrícola. En general estos sistemas buscan conexiones funcionales entre agricultura, producción alimentaria, acuicultura, manejo de los residuos, uso de agua, y generación de combustibles. La conexión se realiza mediante flujos dinámicos de materia y energía, de manera tal que los residuos y subproductos de una operación sean el input de otra operación. Alimentos para hombres y animales, fertilizantes, y combustibles pueden ser producidos con el mínimo input de nutrientes, agua y otros recursos. A la base hay un pensamiento holístico, circular, que evita, porque no puede permitírselas, las trampas del pensamiento lineal: insumo externo-producción-consumo-residuo.

En las zonas rurales un cierto reutilizo sostenible de los residuos siempre ha existido: el uso de los excrementos como fertilizante y de los residuos agrícolas como alimento para



animales. La tecnología actual puede maximizar la eficiencia de las conversiones y crear nuevas maneras de utilizar los residuos.

Un digestor anaeróbico permite integrar la producción energética con la producción agrícola-alimentaria, recirculando eficientemente los nutrientes necesarios al sistema. Durante la conversión anaeróbica se conservan en el efluente todos los minerales y elementos químicos fertilizantes (N,P,K). La materia orgánica se convierte por el 20-50% en biogás, la restante es devuelta al campo, aumentando la retención de la humedad y manteniendo la vida microbiana en el suelo.

Las calidades del biol (estabilidad, presencia mínima de patógenos, altas cantidades de nutrientes) permiten su uso también en otros campos.

Crianza de peces. Algunas comunidades campesinas ya tienen experiencia en este campo, y han logrado adaptar especies de peces a las bajas temperaturas existentes. El uso del biol para la crianza de peces tiene varias ventajas:

- El biol promueve el crecimiento del plankton, principal alimento de muchas especies de peces;
- Las partes sólidas presentes todavía en el biol, también son alimento para los peces;
- El biol ha sido fermentado casi completamente, y entonces hay menor consumo del oxígeno disuelto en el agua, a diferencia del uso directo de estiércol.
- El color del agua se hace más oscuro, contribuyendo a la absorción de la luz solar: aumenta así la temperatura del agua y entonces la velocidad de crecimiento de los peces.
- Las bacterias y los huevos de parásitos mueren durante la digestión: disminuye el riesgo de infecciones respecto al uso de estiércol.
- El bajo olor del biol no contamina el sabor de la carne de los peces.
- Ayuda a mantener neutro el pH del agua.

Además, con la crianza de peces se puede utilizar el biol de manera continua todo el año, evitando problemas de acumulación. La mejor manera es construir las pozas de crianza cerca del digestor, y conducir el biol directamente a las pozas mediante un canal conectado a la salida del digestor.



Cultivo de plantas acuáticas. Tiene las mismas ventajas de la crianza de peces por lo que concierne el uso continuo del biol y su facilidad de aplicación en el caso las pozas sean cerca del digestor. Se pueden cultivar algas y otras plantas acuáticas, que presentan altas velocidad de crecimiento y absorben muchas cantidades de nutrientes. La cosecha de estas plantas es sencilla, bastando arrastrar una especie de rastrillo sobre la superficie de la poza. Estas plantas representan un óptimo forraje. Otro tipo de utilizzo es en el cultivo hidropónico. Es un campo que necesitaría mayor investigación para verificar cuales especies sean indicadas para el clima de las zonas altas.

Mejora de los alimentos para animales. El biol es rico de nutrientes y como tal puede ser usado para aumentar las propiedades nutritivas de forrajes y otros residuos vegetales destinados a la alimentación de los animales. Se rocía el forraje con el biol y se ensila (se cierra en contenedores) para un periodo de hasta dos semanas. Durante este periodo los microorganismos utilizan el nitrógeno presente produciendo nuevas proteínas y ácidos nucleicos. También la digestibilidad del forraje aumenta.

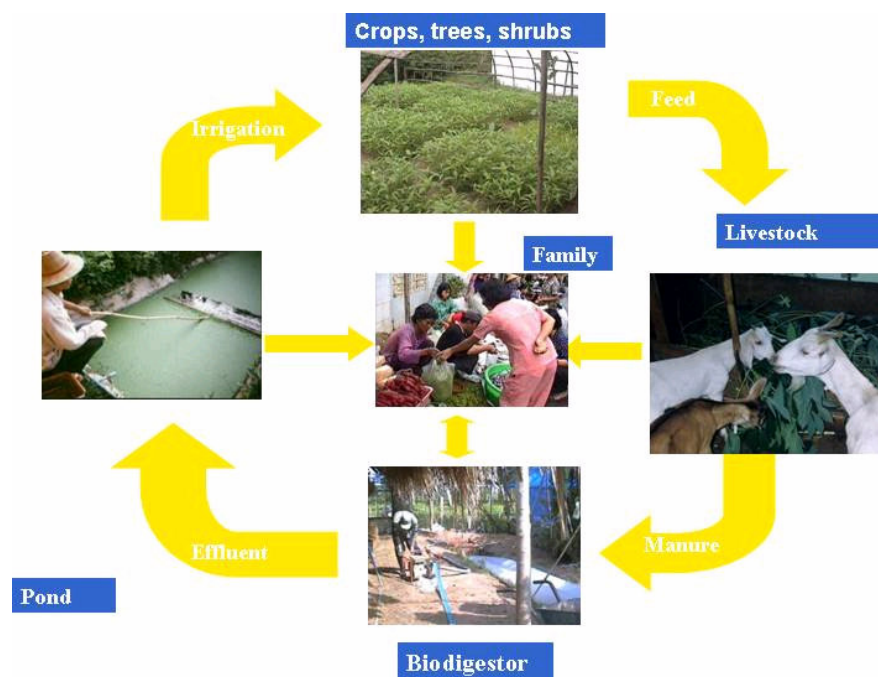


Ilustración 1-5 Ejemplo de sistema integrado [5]

Esta idea de sistema integrado bien se completa y refuerza cuando es acompañado por una idea de desarrollo de las comunidades campesinas como aquella propuesta por el IAA [6].



Sistema integrado agrícola	Desarrollo de comunidad
Búsqueda de un sistema de producción eficiente y económica, con baja dependencia de insumos externos, elevado reciclaje de materia y energía, y autosuficiencia.	Énfasis en la cooperación y en la creación de estructuras que aumenten la autosuficiencia de la comunidad: financiera (fiscalización y presupuesto participativo), alimentar (centros comunales de seguridad alimentar), social (federación campesina, club de madres)
Los campesinos son involucrados en el diseño e implementación de los sistemas integrados. Hibridación entre el conocimiento tradicional y científico. Progreso del conocimiento a través del confronto social (yachachiq) en vez de la aplicación de recetas estándar.	Los miembros de la comunidad participan al diseño y evaluación de los procesos de desarrollo. Recupero de instituciones y practicas indígenas (yachachiq)

1.4.2. Límites a la difusión del digestor

Para un correcto y eficaz funcionamiento del digestor es necesario que sea instalado en un predio con ciertas características [7]:

- disponibilidad de una buena cantidad de biomasa cerca de la planta
- posibilidades de uso del fertilizante cerca de la planta
- usos prácticos de la producción de gas

Las granjas que cumplen estos requisitos son normalmente las que integran la crianza de animales con el cultivo de la tierra [Tabla 1-1].



TIPO DE GRANJA		CARACTERÍSTICAS RELEVANTES PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS	RATIO PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN BIODIGESTOR
Sólo cría de animales		Pastos (nómadas, en racho...) Engordes estacionarios intensivos	No aconsejable Adecuado
Sólo siembra vegetales		Únicamente residuos de cosecha Fermentación dificultosa	Normalmente desaconsejable
GRANJAS MIXTAS			
Cría de animales para:			
Animales de carga		Mayoría de pernoctaciones en establo; sólo algunos animales; 50% del estiércol recolectable	Posible
Producción de carne	Extensiva	Pastos; sin establo; estiércol derrochado	No aconsejable
	Intensiva	Engorde en establos; estiércol recolectado	Adecuado
Producción de leche		Establo permanente normalmente; todo el estiércol y orina usable	Adecuado
Siembra de vegetales:			
Vegetales		Proximo a la casa; residuos vegetal y agua disponibles todo el año	Posible
Cosecha de campos	Sin riego	Una cosecha al año; escasez de forraje; largas distancias de recolección de los residuos y el estiércol	No adecuado
	Con riego	2-3 cosechas año; agua disponible; campos pequeños	Posible

Tabla 1-1 Aspectos condicionantes de una granja para la digestión anaeróbica [7].

La actividad principal de la microcuenca es la pecuaria. En la [Tabla 1-2] se da la media de animales poseídos por familia: la distribución, que no es reportada en la tabla, varía bastante a causa de grandes y pequeños productores. Si el digestor es construido con el objetivo principal de proveer biogás suficiente a la preparación de comidas, deberían ser disponibles al menos 30-40 kg de estiércol animal diarios. No todas las familias disponen de esta cantidad, y eventualmente el digestor sería subalimentado. En otros casos, como en los establos comunales, la cantidad de excrementos es abundante, y el problema consiste en encontrar la manera de aprovechar el biogás producido. Soluciones pueden ser la distribución a las familias vecinas, o la generación de energía eléctrica. De todas maneras, sin considerar su distribución, con la cantidad de residuos recolectables diariamente, sería posible producir una cantidad de biogás suficiente a cubrir cocción de alimentos y calentamiento de agua para todas las familias [Tabla 1-2].

Además de cantidad y distribución de sustrato disponible, otra limitación es representada por el espacio disponible en el predio. En las comunidades que se han visitado durante la investigación, a menudo hay una cierta concentración de las casas y queda poco espacio disponible. El digestor está en “competición” con otros posibles usos del territorio, p.ej.



huertas familiares. Es importante obtener una alta productividad del digestor para reducir su volumen (además de reducir su coste).

Tipo animal	Promedio animales por familia	Kg estiércol recolectable/animal/día	l biogás/kg estiércol	l biogás total/día
Gallinas	4	0.1 (encierre nocturno)	80	32
Cuyes	25	0.07	85	149
Animales de carga	2	8 (encierre nocturno)	50	800
Ovinos	14	1 (encierre nocturno)	70	980
Vacas lecheras	1.7	13 (encierre nocturno)	30	663
Ganados engordados	0.2	9 (encierre nocturno)	50	90
Camélidos	0.5	1.5 (encierre nocturno)	70	52.5
			TOTAL BIOGÁS = 2.7 m³/día/familia	

Tabla 1-2 Potencial de la producción de biogás en la microcuenca de Jabón Mayo. Elaboración del autor a partir de datos IAA (no publicados) y Harris [73].

El obstáculo más importante de las zonas altas andinas parece ser el uso del biol como fertilizante para los campos: los cultivos a menudo son alejados del predio y la topografía del territorio no ayuda a la distribución por gravedad. El uso de canales de riego y del riego por aspersión que se están difundiendo en muchas comunidades puede representar una solución al problema. Otra vez, hay que integrar las varias actividades en fase de diseño para lograr un resultado satisfactorio.

1.5. Adaptación de la tecnología

En los párrafos precedentes se ha mostrado como la digestión anaeróbica pueda representar una solución apropiada a una serie de problemas (energía, saneamiento, fertilizantes). El paso sucesivo es desarrollar el tipo de digestor adaptado a las condiciones particulares de la zona. Las limitaciones principales son de tipo económico y climático. El objetivo del trabajo de campo ha sido investigar un digestor que pudiera adaptarse a las condiciones de las zonas altas andinas.





2. Biología de la digestión anaeróbica

2.1. La digestión anaeróbica en la naturaleza

La digestión anaeróbica es un proceso que ocurre naturalmente cuando la materia orgánica se encuentra en ambientes sin oxígeno, y es parte de la cadena trófica de un ecosistema¹. La acción conjunta de diferentes microorganismos causa la transformación de las moléculas orgánicas y el biogás es uno de los productos del proceso.

El biogás es una mezcla de gases, compuesta principalmente por [8]:

- Metano (CH₄): 40-70 % vol.
- Dióxido de carbono (CO₂): 30-60 % vol.
- Otros gases: 1-5 % vol., incluyendo:
 - Hidrogeno (H₂): 0-1 % vol.
 - Sulfuro de hidrógeno (H₂S): 0-3 % vol.

La composición exacta, entonces, puede variar ampliamente, dependiendo de la composición del sustrato que sufre la descomposición y de las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla. También es presente vapor de agua en saturación: 10 % vol. a 43° C, 5% vol. a 32° C, 1% vol. a 4.5° C (Weast, 1958, citado en [10], p. 51).

En la naturaleza se pueden encontrar fenómenos de fermentación anaeróbica en las lagunas², en los pantanos, en los arrozales. Cuando el metano se mezcla al PH₃ (fosfina), que es producida por la descomposición de compuestos orgánicos contenidos fósforo

¹ La cadena trófica es la corriente de energía y nutrientes que se establece entre las distintas especies de un ecosistema por su alimentación.

² El lago Kivu, en la parte oriental del Congo, ha sido explotado en el pasado para extraer gas metano. Se estima que existan cerca de 55 mil millones de metros cúbicos de metano disueltos a una profundidad de 300 metros. Actualmente existe un nuevo proyecto para aumentar la cantidad de metano extraída y producir electricidad. Es también una medida de seguridad para evitar posibles explosiones de gas (limnic eruption), que representan un alto peligro para las poblaciones costeras: se desgasifica el agua presente en profundidad evitando que llegue a saturación.



(sangre, seso, pescados), puede ocurrir una combustión espontánea: es la causa de los conocidos fuegos fatuos.

Aunque la producción de metano se produce en gran cantidad en los ambientes claramente anaeróbicos, el proceso también se lleva a cabo en lugares como los suelos de bosques o praderas que podrían ser considerados aerobios, debido a la formación de microambientes anóxicos en el interior de las partículas de suelo. También se lleva a cabo la metanogénesis en el intestino de los vertebrados y de los insectos que comen madera como las termitas. La metanogénesis se observa con más frecuencia en los ambientes terrestres y las aguas continentales que en el mar.¹ Cada año se emiten a la atmósfera 600 Tg de metano [11]: el 37% proveniente de humedales (incluyendo arrozales), 19% de rumiantes, 18% de la producción energética, 7% rellenos sanitarios.

Los rumiantes son mamíferos herbívoros que poseen un órgano especial en cuyo interior se lleva a cabo la digestión de celulosa y otros polisacáridos mediante la actividad microbiana, porque estos animales carecen de las enzimas necesarias para digerirlos. Es otro ejemplo de fermentación anaeróbica en la naturaleza, y merece ser profundizado por la afinidad que este órgano tiene con los digestores anaeróbicos.

2.1.1. Digestión anaeróbica en el rumen

El rumen tiene un tamaño relativamente grande, con una capacidad de 100 a 150 litros en una vaca o 6 litros en una oveja, y se encuentra a una temperatura y acidez constantes (39° C, pH 6.5). La naturaleza anóxica del rumen es un factor significativo para su funcionamiento. El forraje llega al rumen o panza, mezclado con la saliva que contiene bicarbonato (que funciona como tampón) y allí es sometido a un movimiento rotatorio durante el cual ocurren las fermentaciones. Esta acción peristáltica facilita la adherencia microbiana al material celulósico suspendido.

¹ Debido a las proporciones más bien altas de sulfato presentes en aguas y sedimentos marinos, donde las bacterias reductoras de sulfato compiten con las poblaciones metanogénicas por el acetato y el H₂ disponibles (que son los precursores inmediatos del metano). La reacción es la siguiente: $4\text{H}_2 + \text{SO}_4^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$, y ocurre también en menor grado en los digestores anaeróbicos, produciendo ácido sulfhídrico que conlleva algunos problemas.



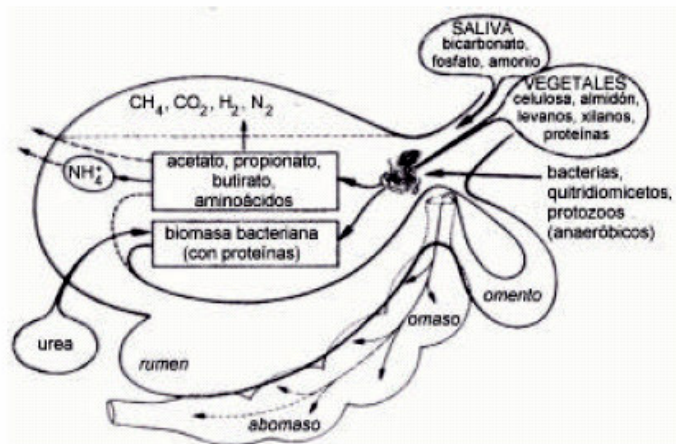


Ilustración 2-1 Esquema de las reacciones que ocurren en el rumen.

El alimento permanece en el rumen de nueve a doce horas. El fluido ruminal contiene gran cantidad de células, entre ellas 10^{10} a 10^{11} bacterias/ml¹. Las bacterias y los hongos celulolíticos actúan produciendo disacáridos y glucosa. Éstos experimentan una acción bacteriana en la que se forman principalmente los ácidos acético, propanoico y butírico, dióxido de carbono y hidrógeno. Los ácidos grasos atraviesan la pared del rumen y pasan a la sangre. Desde allí van a los tejidos donde son utilizados como la principal fuente de energía. Además los microorganismos del rumen sintetizan aminoácidos y vitaminas esenciales para el animal. El CO₂ es reducido a CH₄ mediante el H₂. La composición media de los gases acumulados en el rumen es aproximadamente 65% CO₂ y 35% CH₄, y se expulsan al exterior por los eructos del animal².

La masa de forraje pasa gradualmente a la redécilla donde se forman unas porciones llamadas rumias que regresan a la boca y son masticadas otra vez. Cuando esta masa sólida queda bien fragmentada es engullida de nuevo pero pasa directamente al libro y termina en el cuajar, donde las condiciones son ácidas y allí se inicia un proceso digestivo que continúa en el intestino. Muchas de las células microbianas formadas en el rumen son digeridas y constituyen la principal fuente de proteínas y vitaminas del animal, dado que la pastura es un alimento deficiente en proteínas.

¹ Es una razón por la cual el rumen es utilizado como iniciador en el funcionamiento de los digestores rurales.

² En los digestores es mayor el porcentaje de CH₄ producido, porque se aprovechan también los ácidos grasos que en el rumen al contrario son absorbidos.



Las condiciones ambientales del rumen son constantes para cada tipo de alimentación. El cambio brusco de pasturas a cereales conduce a un desequilibrio en la composición microbiana que causa enfermedad o aún la muerte del animal¹, por el crecimiento explosivo de *Streptococcus bovis* que hidroliza almidón produciendo abundante ácido láctico y acidificando el rumen. Esta acidosis causa la eliminación de la microbiota normal [12].

2.2. Microbiología de la digestión anaeróbica

La microbiología de los digestores anaeróbicos se ha desarrollado decisivamente a partir del final de los años '40. En los últimos años la aplicación de técnicas genéticas ha permitido aumentar el conocimiento sobre los diferentes microorganismos involucrados. El conocimiento y la comprensión del fenómeno es pero lejos de ser completo y unificado: la compleja microbiología del proceso, la importancia de los cambios en el tipo de sustrato tratado, el diseño y las condiciones en las cuales opera el reactor afectan grandemente el tipo concreto de microorganismos y reacciones. El funcionamiento de un digestor no es bajo condiciones estériles o con sustrato esterilizado, como sucede en la fermentación alcohólica: todo tipo de microorganismos entra continuamente al digestor. Por todas estas razones, también es difícil obtener un modelo matemático que describa y prediga la producción de biogás, y de aquí la importancia de plantas pilotos y de pruebas de biodegradabilidad con los sustratos.

A continuación se presentan los elementos necesarios para entender la microbiología que hay a la base del funcionamiento de un digestor. Los microorganismos que realizan la digestión son bacterias. Se pueden encontrar protozoos y hongos pero su papel es marginal y reducido a la fase hidrolítica.

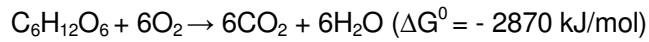
Si se paragona la digestión anaeróbica con los proceso aeróbicos o con otras respiraciones anaeróbicas alternativas² se notará que el proceso metanogénico es el menos esergónico.

¹ Igualmente, los digestores (continuos) tendrán un mejor funcionamiento cuanto más constante sean sus condiciones de funcionamiento. Muchas plantas para la digestión de los residuos municipales orgánicos encuentran dificultades propio a causa de la gran variabilidad de los residuos a tratar.

² Hace falta una aclaración: uso el término digestión anaeróbica para indicar el proceso que prevé la producción de metano. De hecho existen otros procesos biológicos que son anaeróbicos, que se basan sobre otros mecanismos y que decomponen la materia orgánica en otros productos. En el campo tecnológico pero el único proceso anaeróbico utilizado es aquello metanogénico, de aquí la costumbre lingüística.



La reacción de conversión de la hexosa a metano y dióxido de carbono libera solo el 15% de energía libre respecto a la reacción aeróbica [13]:



La diferencia de energía queda almacenada en las moléculas de metano. Como se produce menos energía, los propios microorganismos crecen y se multiplican con lentitud y es mínima la cantidad de calor que se pierde al exterior, a diferencia del proceso aeróbico.

% Energía convertida	Aeróbico	Anaeróbico
Citogénesis	60	10
Calor	40	-
Metano	-	90

Tabla 2-1 Repartición de la energía en los procesos aeróbico y anaeróbico [14].

Siendo energéticamente poco favorecida, la degradación metanogénica necesita una estrecha cooperación entre los microorganismos involucrados. El funcionamiento estable y eficiente de un digestor requiere que estas bacterias encuentren un cierto equilibrio. Cambios en las condiciones ambientales, químicas, etc. pueden afectar este equilibrio, causando un acumulo de ciertas sustancias intermedias que inhiben el proceso global. Es entonces importante entender cuales son las rutas microbiológicas y bioquímicas involucradas en la digestión anaeróbica (AD), para poder aumentar la eficiencia del sistema considerado.

Todos los sustratos para digestores consisten en materia orgánica de origen vegetal u animal. Las bacterias requieren al menos una fuente de energía, una fuente de nitrógeno y algunas sales. Idealmente se puede dividir el proceso entero en tres partes, caracterizadas por las respectivas clases de reacciones y bacterias¹: fermentación (hidrólisis y acidogénesis), acetogénesis, metanogénesis. El tipo de interdependencia entre los diversos

¹ Los linajes bacterianos serán diferentes cambiando el sustrato y la temperatura a la cual se opera el digestor, mas el tipo de actividad es similar y la división del proceso aquí expuesta sigue valida independientemente de las condiciones operativas.



tipos de bacterias es diferente: mientras las bacterias que operan al final de la cadena alimenticia dependen de las primeras para los sustratos, las últimas pueden ejercer influencia eliminando los productos del metabolismo de las primeras.

Hidrólisis y acidogénesis son descritas generalmente con una cinética de primer orden, mientras la metanogénesis con una cinética de Monod.

Tipo de reacción	ΔG° normal kJ/reacción	ΔG° real kJ/reacción
Fermentación		
Glucosa \rightarrow acetato, H ₂ , CO ₂	- 207	- 319
Glucosa \rightarrow butirato, H ₂ , CO ₂	- 135	- 284
Butirato \rightarrow acetato, H ₂	+ 48	- 17,6
Propionato \rightarrow acetato, H ₂ , CO ₂	+ 76,2	- 5,5
Benzoato \rightarrow acetato, H ₂ , CO ₂	+ 49,5	- 18
Acetogénesis		
H ₂ + CO ₂ \rightarrow acetato	- 105	- 7,1
Metanogénesis		
H ₂ + CO ₂ \rightarrow CH ₄	- 136	- 3,2
Acetato \rightarrow CH ₄	- 31	- 24,7

Tabla 2-2 Energía de reacción para las principales reacciones en la digestión anaeróbica, en condiciones normales, y en condiciones reales (con las concentraciones de los reactantes típicas de un digestor) [12].

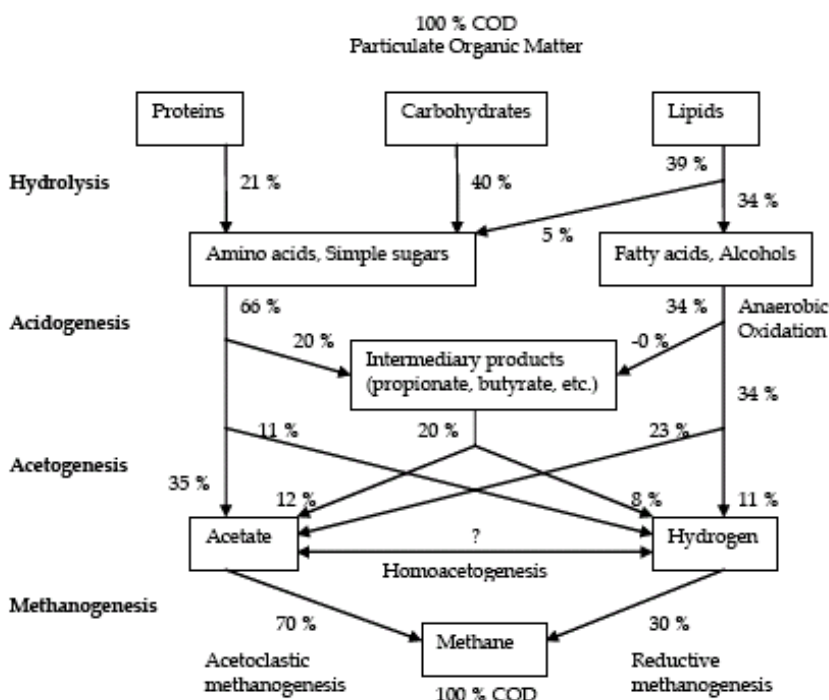


Ilustración 2-2. Esquema de la degradación anaeróbica de la materia orgánica [14].



La fermentación es un proceso de descomposición de los biopolímeros en compuestos de bajo peso molecular. Existe un proceso de hidrólisis, en el cual la materia orgánica es atacada por enzimas extracelulares que convierten los polímeros (polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos) en oligómeros y monómeros (azúcares, aminoácidos, purinas, pirimidinas, ácidos grasos de cadena larga, glicerol). Estos enzimas son producidos por bacterias no necesariamente anaeróbicas¹. La mayor parte de estas bacterias adhieren a las partículas para poder proceder con la hidrólisis. Entre los diferentes sustratos, la celulosa es más resistente a los ataques enzimáticos respecto a proteínas y lípidos: su degradación puede ser la reacción limitante en la producción de biogás [15][16]. Al término de esta fase, gran parte de la biomasa es soluble en agua, permitiendo la acción de las otras bacterias (por esta razón a veces el proceso se llama con el nombre de licuación).

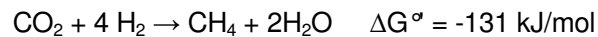
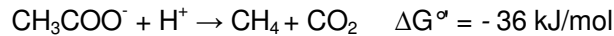
En la segunda parte de la fermentación, los materiales solubles son ingeridos por los microorganismos y catabolizados mediante endoenzimas para formar otros productos: principalmente ácidos grasos (acético, propanoico, butírico, láctico, succínico), hidrogeno, anhídrido carbónico, etanol. Esta fase de la fermentación se conoce también con el nombre de acidogénesis, por la gran cantidad de ácidos grasos formada. Con el término de ácidos grasos volátiles (VFA) se indica el conjunto de los ácidos acético, propanoico, butírico.

Los sustratos como ácido acético, H_2 , CO_2 y otros compuestos que tengan solo un átomo de carbono pueden ser convertidos directamente a metano por las bacterias metanogénicas, como se verá a continuación. Otros compuestos como ácidos grasos con más de dos átomos de carbono, alcoholes con más de un átomo de carbono, compuestos aromáticos, son degradados por el segundo grupo de bacterias, las acetogénicas. Estas bacterias convierten sus sustratos en acetato, H_2 y CO_2 , compuestos que serán utilizados sucesivamente en la metanogénesis. Aunque una parte del acetato y del H_2 es producida durante la fermentación acidogénica, ambos productos derivan principalmente de la acetogénesis de los ácidos grasos. Existe también otro grupo de bacterias, llamadas homoacetogénicas, que producen acetato a partir de CO_2 y H_2 . Su efecto es poco decisivo, a menos de ambientes ácidos o con baja temperatura [13].

¹ Los microorganismos aeróbicos consuman el oxígeno disuelto en el material que entra al digestor, creando así el ambiente anóxico necesario a las bacterias metanogénicas (que son anaeróbicas estrictas). Existen también experiencias de creación de microambientes aeróbicos al interior del digestor para favorecer la hidrólisis a través de microorganismos aeróbicos y facultativos.



Las bacterias metanogénicas son anaeróbicas estrictas: el nivel de O₂ disuelto debe ser inferior a los 0.01 mg/l y el potencial redox inferior a -300 mV. Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de una u otra bacteria metanogénica, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina [12]. Pero la mayoría del metano se forma a través de la conversión del acetato, y lo restante a través de la reducción de la CO₂ en la reacción con H₂:



Los valores de energía libre se refieren a condiciones de 25° C, pH 7 y soluciones acuosas con actividad igual a 1.

Las bacterias acidogénicas presentan una tasa de crecimiento superior a las metanogénicas [17], cuando no haya escasez de sustrato: si se verifica un aumento repentino de la carga diaria al digestor, y entonces de nutrientes orgánicos disponibles, las acidogénicas se reproducen más rápidamente de las metanogénicas, causando un acumulo de H₂ que inhibe la acetogénesis, y consecuentemente de ácidos que puede inhibir la metanogénesis. Mantener constante la carga diaria y en particular el OLR (organic load rate, la cantidad de materia orgánica alimentada periódicamente, medida en kg VS/m³ digestor/día) es fundamental para la estabilidad de la AD.

El hidrogeno es el compuesto clave en la AD y determina la interdependencia entre las bacterias acetogénicas y metanogénicas. Un ejemplo clásico para entender esta relación es lo del "*Methanobacillus omelianskii*", un cultivo que es compuesto por dos especies diferentes de microorganismos que cooperan en la conversión del etanol a acetato y metano [13]:

Strain S: $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2$ ($\Delta G^\circ = +19$ kJ por 2 mol de etanol)

Strain M.o.H: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ($\Delta G^\circ = -131$ kJ por mol de metano)

Cultivo: $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}^+ + \text{CH}_4$ ($\Delta G^\circ = -112$ kJ por mol de metano)

En este caso se ve como la reacción acetogénica no sea posible en condiciones estándar, siendo endergónica. Solo cuando la presión parcial del hidrogeno es mantenida suficientemente baja (<100 Pa), gracias a la reacción metanogénica que consume el hidrogeno, esta se vuelve esergónica. Así que ninguna de las dos especies puede



aprovechar el etanol de manera autónoma, y la degradación del etanol a metano es posible solo mediante esta estrecha cooperación. El mismo esquema se repite en el caso de la degradación de los ácidos grasos, con presiones parciales de H_2 todavía inferiores (<10 Pa) [12]. Estas relaciones entre bacterias se llaman sintróficas y son a la base de la oxidación del etanol y de los ácidos grasos a acetato. El compuesto que acopla los microorganismos es el H_2 , aunque recientes estudios hayan avanzado la hipótesis que exista también el formiato [13]. Cuando, por alguna razón, no hay suficiente consumo de H_2 , decrece la producción de acetato y se van acumulando otros ácidos más largos, causando el característico mal olor que desprenden los digestores malfuncionantes. La degradación del ácido propanoico a acetato es la más sensible a la concentración de H_2 , y por esta razón en los digestores desequilibrados frecuentemente se encuentran altas concentraciones en propionato.

La separación de funciones metabólicas en microorganismos diferentes, como oxidación del sustrato y producción de hidrogeno en un organismo y reducción de CO_2 y oxidación de H_2 en otro, es una estrategia inusual, que hasta ahora no se ha observado en ambiente aeróbicos. Tiene la ventaja de permitir una alta especialización metabólica de los organismos en el uso de la energía: las bacterias acetogénicas sintróficas que operan en la AD crecen con el cuanto mínimo de energía que puede ser utilizada por una célula [13]. De todas maneras, tal eficiencia metabólica puede ser obtenida solo si hay eficiencia en el transporte del metabolito entre las especies: el flujo de H_2 entre la especie productora y la consumidora es inversamente proporcional a la distancia entre las dos. La transferencia óptima ocurre cuando las dos especies son en contacto, por ejemplo directamente atacadas una a la otra, formando un agregado o granulo. Estos agregados se forman naturalmente al interior del digestor, lentamente, unos meses después de lo start-up [13]. Son a la base del funcionamiento de reactores a alta velocidad como los UASB, en los cuales los gránulos se separan del sustrato digerido, quedándose al interior del reactor.

2.3. Parámetros físico-químicos de la digestión anaeróbica

En este capítulo se exponen los parámetros que afectan la AD y que es necesario saber para proceder al diseño y al mantenimiento del digestor. Son parámetros físico-químicos que influyen el comportamiento de los microorganismos y que es posible controlar en digestores de bajo costo e instalados en zona rurales. No se trata de un control estricto y complicado de los parámetros como en las instalaciones industriales, sino de permitir el avance regular y mejorar la eficiencia de la digestión, en particular aumentar la cantidad de biogás producida y los beneficios económicos del digestor. La discusión de los varios parámetros es limitada a sus efectos cualitativos sobre la producción de biogás, ya que cuantitativamente la producción depende de la interacción de todos los parámetros entre



ellos. Cada grupo metabólico de bacterias (hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas, metanogénicas) necesita diferentes condiciones para su crecimiento: las que aquí se presentan son las condiciones que permiten un crecimiento equilibrado de la entera población bacteriana¹.

2.3.1. Temperatura del sustrato

La AD en principio es posible aproximadamente entre los 3º C y 70º C. Al cambiar la temperatura cambian los consorcios bacterianos presentes. La investigación ha llegado a individuar tres intervalos de temperatura, en los cuales predomina la actividad de un cierto consorcio [8]:

BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS	SENSIBILIDAD
Psicrofílicas	Menos de 20 ºC	+ - 2 ºC/hora
Mesofílicas	Entre 20 ºC y 40 ºC	+ - 1 ºC/hora
Termofílicas	Más de 40 ºC	+ - 0,5 ºC/hora

Las bacterias y sobretodo las metanogénicas son sensibles al cambio repentino de temperatura del medio en el cual crecen y su actividad puede inhibirse dependiendo de la amplitud del cambio. Las bacterias fermentativas son menos sensibles a estos cambios de temperatura, pudiendo continuar a producir ácidos grasos volátiles (VFA) durante la inactividad metanogénica, y creando así un ambiente demasiado ácido para poder recuperar la AD incluso cuando se haya estabilizado la temperatura. De aquí la importancia de aislar oportunamente el digester y la practica difundida de construirlo bajo tierra, para evitar precisamente estos desequilibrios en la población microbiana. También hay estudios que reportan una mayor resistencia a los cambios de temperatura cuando la concentración de sólidos en el fluido es mayor [18].

La actividad microbiana, y entonces la producción de biogás, aumenta al aumentar de la temperatura, pero una temperatura demasiado alta causa la degradación de los enzimas necesarios al metabolismo: en la [Ilustración 2-3] se ve como cada grupo de bacterias

¹ Existe el caso de la AD en dos etapas, en la cual en un primer reactor se desarrolla la fase hidrolítica y acidogénica y en un segundo la generación de metano: en este caso es posible crear dos diversos ambientes de reacción [19]. No es el caso de nuestro digester que es a una sola etapa, y en el cual entonces hay que mediar los parámetros entre las diferentes exigencias de las bacterias.



metanogénicas tenga un máximo de crecimiento al interior de su respectivo intervalo de temperatura.

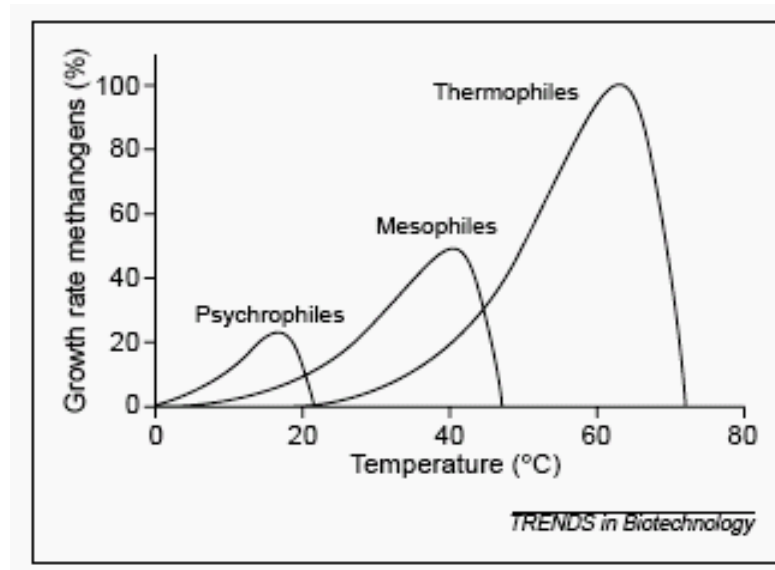


Ilustración 2-3. Relación entre la tasa de crecimiento y la temperatura para los tres grupos metanogénicos [20].

La AD termofílica es posible solo mediante calentamiento del digestor y necesita un control sofisticado de la temperatura: no existen digestores rurales de este tipo.

La mayor parte de los digestores instalados en zonas calidas o dotados de un sencillo sistema de calefacción son de tipo mesofílico. En los últimos años ha aumentado el número de investigaciones e instalaciones con temperaturas psicrófilas.

2.3.2. pH del sustrato

La producción de ácidos grasos durante la fase fermentativa causa la disminución del pH del fluido en digestión. Con el avanzar de la digestión se produce amoníaco (NH_3) a partir de la descomposición de las proteínas y de la reducción de los nitratos: NH_3 es soluble en agua y tiene un carácter básico que neutraliza los ácidos presentes. Una vez que el proceso se haya estabilizado, el pH del digestor adquiere un valor ligeramente básico de 7-7.2 [14], que son los valores óptimos para la AD. También se han reportado valores de hasta 8.5 [8]. La cantidad de N presente en la alimentación del digestor es decisiva para que se alcancen valores correctos de pH [apartado 2.3.3].

Fermentación y metanogénesis en principio tienen diferentes pH óptimos. Las bacterias metanogénicas son inhibidas en ambientes ácidos, a un pH inferior a 6.2 [8], y prefieren un ambiente ligeramente alcalino. La fase fermentativa, al contrario, es más rápida en



ambiente ácido, el valor exacto dependiendo del tipo de sustrato. En el caso de azúcares simples, como la glucosa, o biopolímeros estructuralmente sencillos, como el almidón, se han encontrado valores óptimos del pH entre 5.7 y 6.1. En el caso de la celulosa, los enzimas celulíticos tienen un pH óptimo alrededor de 6.7. Siendo que la celulosa es generalmente uno de los sustratos más abundantes en los digestores rurales, el pH típico de 7.2 no es tan lejos del óptimo para la fase de fermentación.

En un digestor en funcionamiento existe una autorregulación del pH mediante efecto tampón (buffer), causado por los sistemas dióxido-bicarbonato ($\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$) y amoniación amonio ($\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$). Proteínas y otros compuestos orgánicos también participan al efecto tampón. Cambios de acidez en la alimentación o al interior del digestor, son amortiguados por la capacidad de buffer del sistema. A causa de este efecto, la medida del pH no es una indicación útil de la cantidad de ácidos grasos presentes, ya que el tampón puede absorber gran parte de los H^+ . Puede ocurrir así que el nivel de los ácidos suba hasta valores inhibitorios [apartado 2.3.4.] para la metanogénesis, sin que la medida del pH lo haya relevado.

En el caso de digestor “agriado”, se puede añadir cal, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o bicarbonato sódico, para recuperar la neutralidad. El carbonato de sodio, aunque es más caro, puede prevenir la precipitación de carbonato de calcio. Debido a que los requerimientos de sustancias tamponadoras varían con la naturaleza de los desperdicios a procesar, el sistema de operaciones y el tipo de proceso, se han desarrollado guías para calcular los requerimientos de sustancias buffer (ver por ejemplo Pohland y Suidon 1978).

2.3.3. Relación carbono/nitrógeno

El nitrógeno presente en la alimentación tiene dos beneficios: provee un elemento esencial para la síntesis de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos de las bacterias; y es convertido en amoníaco, compuesto básico, fundamental en mantener la neutralidad del pH. Un exceso de N en la alimentación causa una formación excesiva de amoníaco, tóxica para los metanogénicos. Es entonces importante que la alimentación contenga una cantidad equilibrada de nitrógeno: generalmente se indica la cantidad de nitrógeno en relación a la cantidad de carbono. Valores de C/N inferiores a 10:1 son considerados inhibitorios a causa de una excesiva formación de NH_3 ; valores superiores a 30:1 no son recomendables a causa de la escasez de N, que disminuye la velocidad de crecimiento bacteriana [14][18].

En la literatura [4] se encuentran las tablas que reportan los valores C/N de los sustratos típicos de origen rural. Es así posible combinar diferentes sustratos (codigestión) para obtener un C/N global aceptable. Los valores de literatura son valores medios y como tales van tomados. Siempre hay que considerar las condiciones ambientales en las cuales se va



a realizar la AD. Por ejemplo el ganado de los altiplanos recibe una alimentación escasa en proteínas, y por ende la relación C/N podría ser más alta que de la que se encuentra en la literatura [21].

Las relaciones C/N que se encuentran en las tablas se refieren a las cantidades absolutas de estas sustancias en los sustratos; pero no todo el carbono y el nitrógeno es igualmente disponible a las bacterias, la disponibilidad pudiendo variar al variar de los otros parámetros de funcionamiento del digestor. Por esta razón, se han encontrado digestores funcionando eficientemente con relaciones C/N inferiores a 10 y mayores de 90 [18]. También en este caso es recomendable efectuar pruebas de laboratorio para verificar el comportamiento de los sustratos y de sus combinaciones.

2.3.4. Nutrientes y toxicidad

A parte de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, los microorganismos necesitan otros tipos de nutrientes en pequeñas cantidades, como azufre, potasio, calcio, magnesio y otros elementos traza como hierro, manganeso, molibdeno, cinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc.. A bajas concentraciones estos elementos son estimulantes; altas concentraciones producen efectos inhibidores sobre el proceso, siendo las metanogénicas las bacterias más sensibles. Valores límites de toxicidad pueden encontrarse en la literatura ([8], p15). Difícilmente los residuos de origen rural, como excretas animales o residuos vegetales, presentan problemas de este tipo. Los aniones inorgánicos como sulfatos y nitratos son inhibidores parciales de la metanogénesis por su capacidad de ser aceptores alternativos de electrones (reacción con H_2).

Detergentes y antibióticos (Bacitracin, Flavomycin, Lasalocid, Monensin, Spiramycin, etc.) [8] a veces se usan en la ganadería: hay que evitar que las corrientes así contaminadas entren al digestor.

Altas concentraciones de VFA como acetato, propionato o butirato, son asociadas con efectos tóxicos. No es claro si los ácidos en si mismos sean tóxicos, o si la toxicidad es causada por la creación de un ambiente ácido. Solo en el caso del propionato se ha verificado un efecto tóxico, a concentraciones superiores de 1000 ppm [18]. Excesos de VFA pueden alcanzarse cuando se alimenta el digestor con una cantidad excesiva de material fácilmente fermentable: ocurre una gran producción de ácidos, mayor de la cantidad removida por la metanogénesis, pudiendo superar la capacidad de buffer del sistema.

La toxicidad por amoníaco (NH_3) es un problema típico en los sustratos con altas cantidades de proteínas. En solución acuosa el amoníaco es una base débil, y da origen al equilibrio [22]:





El amoníaco libre (gas disuelto) es mucho más tóxico que el ión amonio (NH_4^+). En general, el nivel de NH_3 no debe superar los 200-300 ppm (mg/l), mientras el nivel de NH_4^+ puede llegar a valores de 1700 ppm. Dado suficiente tiempo, las bacterias pueden adaptarse hasta valores de 5000-7000 ppm de NH_4^+ [8]. La disociación de NH_3 en agua depende de la temperatura y del pH: al aumentar de T y de pH, aumenta la concentración de NH_3 libre. Una ventaja de los digestores psicrófilos es entonces la menor concentración de NH_3 en el fluido [23].

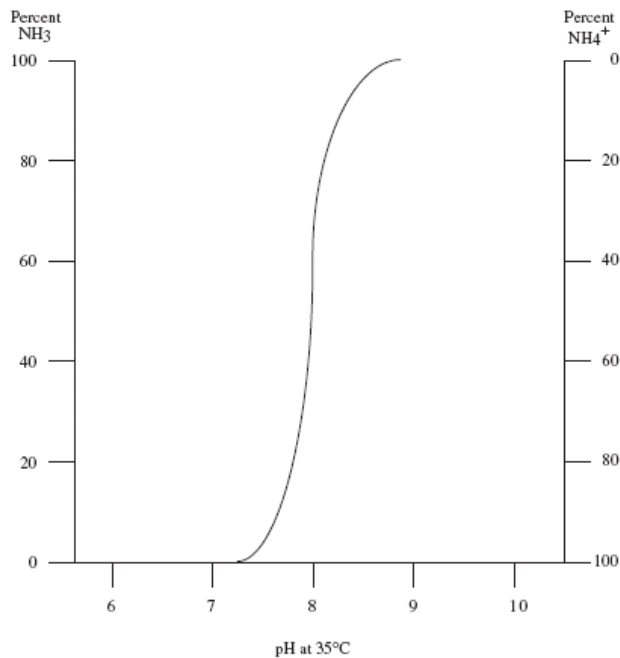


Ilustración 2-4 Concentración de amoníaco libre y ionizado al variar del pH [24].

Parámetros como pH, tiempo de retención hidráulica (HRT), sólidos totales (TS) influyen en la sensibilidad, la respuesta y la adaptabilidad de las bacterias a las sustancias tóxicas [18]. Por ejemplo un alto valor del HRT aumenta la posibilidad de adaptación de las bacterias y minimiza los problemas de toxicidad: las sustancias tóxicas disminuyen la velocidad de crecimiento de las bacterias, y entonces un alto HRT evita que se verifique el “washout” de la masa bacteriana (otra vez, el problema es más agudo para acetogénicas y metanogénicas, que presentan las tasas de crecimiento más bajas). Los digestores rurales generalmente trabajan con altos valores de HRT y pueden así aprovechar de esta capacidad de adaptación de las bacterias a las diferentes sustancias tóxicas (amoníaco, VFA, metales, antibióticos...). Existe la posibilidad de precipitar los metales pesados como sales insolubles en la fase de pre-tratamiento de la alimentación.



3. Tecnología de la digestión anaeróbica

La producción de biogás mediante digestión de materia orgánica se realiza a través de un sistema de diferentes operaciones y tecnologías [25]:

- Recolección y transporte del residuo (influyente)
- Digestión anaeróbica en el digestor
- Almacenaje y uso del fertilizante líquido (efluente)
- Transporte, almacenaje y uso del biogás

Un recipiente cerrado que mantenga un ambiente anóxico en su interior y que tenga una salida para extraer el biogás producido es la base para cualquier digestor. Los digestores rurales pueden clasificarse en base al tipo de alimentación (continua, semicontinua, batch, fed batch), al contenido en sólidos de la alimentación (húmeda/seca), al tipo de flujo del sustrato al interior del digestor (CSTR, plug-flow), a la geometría constructiva del digestor (horizontal, vertical), al sistema de acumulación del gas (cúpula fija, flotante, gasómetro separado), al material de construcción (cemento, ladrillos, ferrocemento, plástico, madera), al sistema de crecimiento bacteriano (suspendido, retenido) etc. En la literatura se pueden encontrar numerosas referencias [7][8][9][14][17][18][25][26] que bien describen los diferentes tipos de digestores rurales. En esta tesis se describirá únicamente el tipo de digestor objeto de la investigación, es decir el digestor tubular de plástico.

3.1. Digestor tubular de plástico

El digestor tubular es esencialmente un largo cilindro, con alimentación continua y en el cual el residuo se mueve un flujo de tipo pistón: los residuos entran por un lado y por el otro lado sale una misma cantidad de lodo digerido. Con este tipo de digestor, en el efluente se pierde continuamente una cierta cantidad de biomasa bacteriana. Esto implica que una parte del residuo es utilizada por la síntesis de nuevas bacterias, disminuyendo la cantidad de materia orgánica que es convertida en biogás. El PTD, como también los otros digestores rurales tradicionales (chino e hindú), es entonces menos eficiente en la producción de biogás que los digestores de biomasa retenida [17]. El digestor es instalado bajo tierra, en una zanja, para que el plástico mantenga la forma cilíndrica, descargando el peso del fluido sobre las paredes de la zanja. Parte del volumen es ocupado por el fluido en digestión mientras en la parte superior del digestor se acumula el biogás producido. Si



se decide instalar un gasómetro a parte para acumular el gas, es posible aprovechar hasta el 90% del volumen total del digestor para la digestión de la mezcla.

El diseño básico se originó en Taiwán a finales de los '60, como respuesta a los problemas que se originaban con los digestores en metal u hormigón, entre los cuales [8][27][28][29]:

- Alto coste de instalación. Generalmente la difusión de estos digestores se hizo posible gracias al apoyo y subvenciones gubernamentales (caso de China e India).
- Dificultad técnica en la construcción del digestor: puede ser realizada proficuamente solo por trabajadores especializados.
- Dificultad en la manutención y en el reemplazo de partes del digestor, a causa de la indisponibilidad de habilidades y materiales necesarios.
- Necesidad de una eficiente organización central que se ocupe de capacitación, construcción, manutención.

Al principio el digestor tubular se construía con neopreno o con otra membrana llamada RMP (Red Mud Plastic) producida con los residuos de la elaboración del aluminio [30]. La lámina es soldada térmicamente para darle forma tubular. La operación de soldadura debe ser realizada cuidadosamente para evitar eventuales fugas de líquidos y/o gas durante el uso del digestor, y necesita de maquinarias difundidas solo en los centros urbanos.

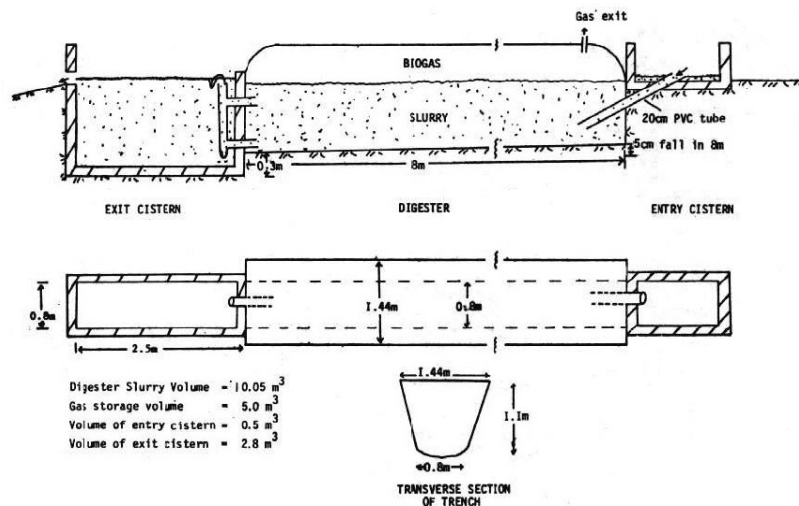


Ilustración 3-1 Esquema del “Red Mud digester”, introducido en Taiwán por Pound *et al.* (1981), [30].



En los años sucesivos empezó a trabajarse con PVC; el digestor venía construido juntando diferentes membranas de PVC mediante soldadura o pegamiento. Una ventaja del PVC es la existencia de pegamientos suficientemente potentes.

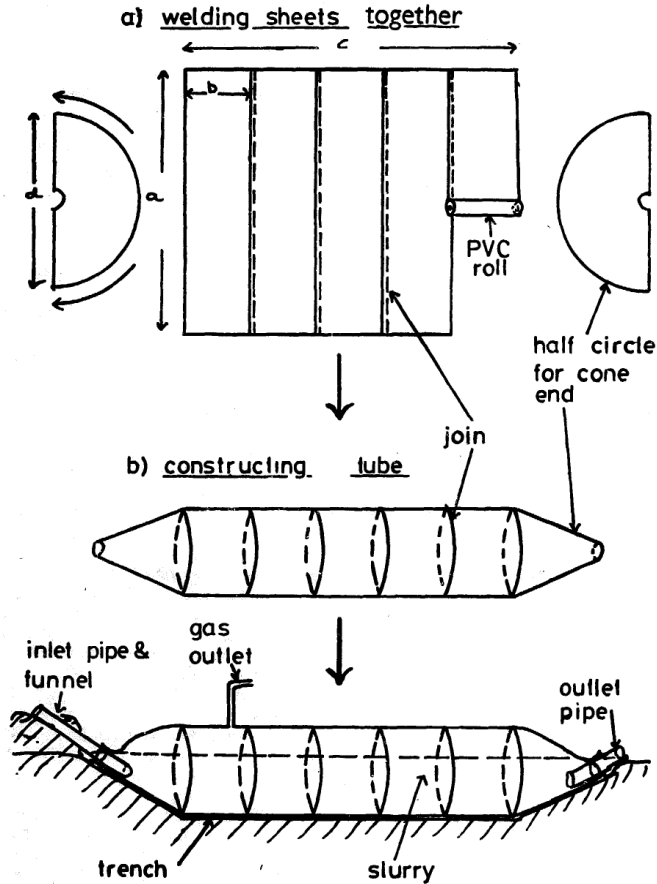


Ilustración 3-2 Construcción de un digestor tubular en PVC [31]

Sucesivamente el diseño vino ulteriormente simplificado en proyectos realizados en Etiopía, Colombia y Vietnam por Thomas Preston y sus colaboradores [28], y sobre este diseño se basan las instalaciones realizadas en la presente investigación. Este tipo de digestores se construye con laminas de polietileno, que tienen la ventaja de salir de la industria manufacturera en forma tubular, evitando así el problema de la soldadura. Al extremo del tubo de PE se fijan los tubos de carga y descarga del residuo, y en la parte superior se instala la tubería para el transporte del biogás producido hasta el gasómetro. En el [anexo A] se presenta el manual con todas las instrucciones detalladas para construir el digestor.

3.1.1. Características del digestor tubular

En este apartado se describen las características del digestor tubular, y donde sea posible en relación con otros tipos de digestores. El objetivo de la investigación era verificar la



posibilidad de la AD en las condiciones climáticas, ambientales y económicas del altiplano andino.

1) TIPO DE ALIMENTACIÓN. Cuando los residuos se producen diariamente, como en el caso de la ganadería, es conveniente dotarse de un digestor continuo, en el cual la alimentación del digestor pueda seguir el ritmo de producción de los residuos, que de esta manera pueden ser alimentados frescos. La acumulación previa de los residuos causa la disminución de la materia degradable (disminuye el potencial de biogás obtenible) y de amoníaco (disminuye el poder fertilizante del biol). Los digestores continuos aseguran una producción constante de biogás, mientras en los batch la producción va disminuyendo a medida que avanza la digestión. Para obviar a esta fluctuación en la producción batch es posible instalar una batería de digestores operantes en paralelo, aunque su operación necesite de más trabajo respecto al digestor continuo. Los digestores continuos son preferibles cuando el sustrato tenga ya una cantidad elevada de humedad, como en el caso de las excretas animales, mientras los batch se prefieren en el caso de digestión seca (contenido en TS mayor del 25%).

2) TIPO DE FLUJO. En el digestor tubular plástico (PTD) los residuos se mueven con un flujo tipo pistón (plug-flow). Hidrólisis y acidogénesis del sustrato ocurren principalmente al comienzo del digestor, mientras la producción de metano va aumentando a lo largo del reactor. En un digestor tubular la concentración del sustrato es máxima al comienzo, para ir disminuyendo a lo largo del digestor. En digestores mezclados, como lo son en algunos diseños chinos e indios, la concentración del sustrato es uniforme en todo el reactor. Algunas reacciones, como la hidrólisis, presentan una velocidad que aumenta al aumentar de la concentración del sustrato, y en este aspecto el plug flow es favorito. El flujo tipo plug-flow además evita la posibilidad de cortocircuito del residuo entre entrada y salida, y en el caso la alimentación contenga excepcionalmente alguna sustancia tóxica, la difusión de la toxicidad será menor, evitando así de inhibir toda la biomasa bacteriana como en el caso de un digestor mezclado. Hayes et al. (1979, citado en [18]) hizo una experiencia alimentando con estiércol de vaca al 12.9% TS, un digestor de mezcla completa (CSTR) y un plug-flow. El digestor plug-flow dio una producción de biogás del 10% superior.

Generalmente la relación largo/diámetro (L/D) del PTD es comprendida entre 3:1 y 10:1. Un PTD excesivamente estrecho no permite una suficiente mezcla del influente con las bacterias metanogénicas contenidas en el digestor y difícilmente puede adaptarse al espacio disponible. Un PTD excesivamente ancho no tendrá un flujo pistón y tendrá más tendencia al cortocircuito del influente. Se ha estudiado la influencia de L/D sobre la producción de gas (m^3 biogás/ m^3 digestor/día), pero los resultados son divergentes. Bui Phan (2003, [32]) reporta haber obtenido una productividad del 50% superior con un ratio L/D de 7.8 respecto a 3.1, mientras San Thy *et al.* (2005, [33]), utilizando los mismos



valores de velocidad de carga orgánica ($4 \text{ kg TS/m}^3 \text{ digester/día}$) no encontró diferencias significativas con L/D en el rango de 13:1 y 3:1.

3) DISPOSICIÓN. Los digestores rurales pueden dividirse entre verticales y horizontales, y generalmente ambos los tipos se construyen enterrados. Los digestores no enterrados permiten una manutención más sencilla, pero necesitan de materiales especiales (acero) para aguantar la presión y son más expuestos a las variaciones climáticas. En el digestor enterrado hay la importante ventaja de poder alimentar los sustratos por gravedad.

Un digestor horizontal enterrado, respecto a un vertical, tiene las siguientes características:

- Es adecuado cuando no sea posible excavar en profundidad el terreno, sea por la presencia de una capa rocosa, sea por el alto nivel freático.
- Necesita de superficies mayores para su instalación. Puede representar un problema cuando el terreno a disposición del usuario sea reducido.
- Respecto a un digestor vertical de igual volumen, tiene una mayor superficie expuesta a la atmósfera, y entonces es menor su aislamiento. Puede ser una ventaja en el caso de regiones soleadas para aumentar la temperatura interna del digestor.
- El lodo generalmente forma una capa superficial de residuos fibrosos, que flotan por encima del líquido subyacente. Con el tiempo esta capa (scum) se hace más gruesa y compacta, constituyendo un obstáculo a la salida del biogás. Los digestores horizontales ofrecen una superficie más grande en relación al volumen de líquido contenido: el grosor de la capa será entonces menor respecto a un análogo digestor vertical.

3) AGITACIÓN. La agitación del lodo lleva una serie de ventajas:

- Reduce la formación de lo scum. Los sólidos que se acumulan en los scum son menos disponibles para los organismos, y pueden dificultar la salida del gas. Así que en un digestor con scum la producción de metano de biogás será probablemente inferior.
- Reduce la sedimentación de los inertes, que reducen el espacio para la AD.
- Elimina la estratificación térmica, que puede ser problemática en un PTD expuesto directamente al sol.



- Favorece la dispersión de los metabolitos, y el contacto entre microorganismos y alimentos.
- Disminuye la dimensión de agregados y partículas que presentan escasa superficie específica.

Para que la agitación sea eficiente debería llevarse a cabo para largos periodos del día, generando un cierto gasto energético. La agitación manual ocasional presenta menores ventajas. Algunos digestores plug flow se completan con un agitador radial [Ilustración 3-3], de manera que sea posible romper lo scum, disminuir la estratificación térmica y la sedimentación, evitando pero de mezclar las diferentes fases longitudinales del digestor. Este tipo de agitador necesita de soportes rígidos para sostener el eje, de sellos especiales para evitar fugas del lodo, y de un espacio enterrado para poderlo maniobrar. Es un conjunto de factores que dificulta su implementación. En esta investigación se planteó realizar un agitador, maniobrado a través de una cuerda por dos personas a los extremos del digestor, con un movimiento tipo péndulo no demasiado amplio para no modificar el flujo pistón del lodo [Ilustración 3-4]. Modificando el peso de los elementos conectados a la cuerda en principio sería posible determinar la zona afectada por la agitación. Finalmente la solución no se aplicó por el riesgo que los elementos en movimiento pudieran dañar el plástico internamente, y la probable dificultad para convencer al usuario en cumplir con la práctica.

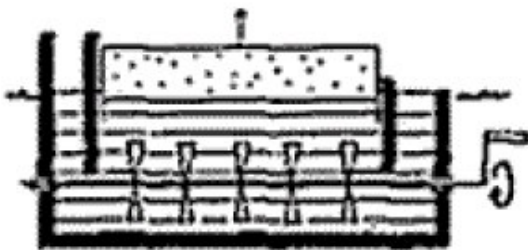


Ilustración 3-3 Mezclador radial en digestor plug flow [34].

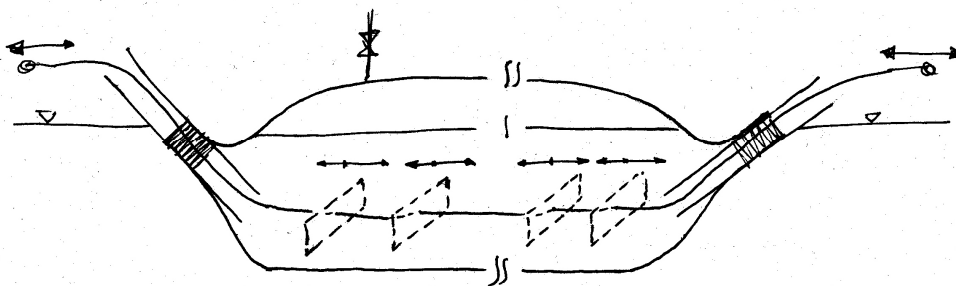


Ilustración 3-4 Esquema de un PTD completado con un sistema de agitación.



3) MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN. Para que una tecnología sea apropiable hace falta que el material utilizado sea normalmente disponible en la zona, a un coste accesible, y que su uso no represente un riesgo para la salud y el medioambiente. En esta investigación el material utilizado para realizar el cuerpo del digestor fue polietileno de baja densidad (LDPE), producido por soplado. Este material evidentemente no puede ser producido directamente por los campesinos, pero es difundido en los mayores centros poblados y generalmente es utilizado para la construcción de invernaderos o como techado para ciertas instalaciones provisionarias. Tiene la ventaja de ser fácilmente transportable a causa de su peso reducido (186 g/m^2 para un film en LDPE de 0.2 mm de grosor, densidad 0.930 g/cm^3) a diferencia de otros materiales como ladrillos, cemento, laminas metálicas. Otros materiales necesarios como tuberías y juntas plásticas se encuentran normalmente en las ferreterías. La facilidad de transporte puede resultar fundamental a la hora de planear la difusión del digestor.

Generalmente el LDPE para invernaderos es adicionado con sustancias antioxidantes y estabilizadoras, y contener algún tipo de copolímero que mejora sus propiedades mecánicas. La presencia de pigmentos puede volverlo opaco a la luz. La luz no es necesaria para el proceso metanogénicos, y además la radiación solar penetra mínimamente al interior de la mezcla. La ausencia de radiación inhibe la actividad de dos clases de microorganismos eventualmente presentes en el digestor:

- Microorganismos fotosintéticos, evitándose así la producción de O_2 dañina para los metanogénicos;
- Microorganismos reductores de H_2S , que de hecho a veces se utilizan para remover el H_2S del biogás.

4) CONSTRUCCIÓN. La instalación del digestor tubular de plástico (PTD) no presenta dificultades técnicas y puede ser realizada autónomamente por el usuario sin necesidad de asesoramiento técnico directo. Todas las operaciones pueden ser ejecutadas manualmente, con el soporte de herramientas comunes, y dos personas pueden instalar un digestor familiar ($5\text{-}10 \text{ m}^3$) en 2-3 días. La facilidad de la construcción permite una difusión del PTD mediante capacitación campesino-a-campesino. Al contrario, un digestor como el tipo chino, necesita de constructores expertos para realizar adecuadamente la instalación y que al mismo tiempo aumentan el coste de instalación.

5) COSTO DE LA INSTALACIÓN. Es la característica más importante del digestor tubular de plástico. El bajo costo es debido al tipo y la cantidad de materiales empleados y al hecho que la instalación puede ser realizada directamente por el usuario, sin necesidad de recorrer a mano de obra externa. En Vietnam, donde se han realizado más de 20000 instalaciones (Bui Xuan, 2002, [27]), en media, el costo resultó ser cinco veces inferior



respecto a los modelos en hormigón o metal. De esta manera el digestor pudo difundirse gracias a la iniciativa privada de los campesinos, sin necesidad de apoyos económicos gubernamentales o de ONG (aunque cabe señalar que en los casos de pobreza más grave la instalación del PTD sigue siendo económicamente impracticable [35]. Este aspecto es importante a la hora de planear la eventual difusión del PTD en las comunidades andinas, al fin de evitar que la difusión del digestor sea otra causa de las diferencias en las condiciones de vida entre los miembros de una misma comunidad). En el caso de China, el número de digestores instalados anualmente disminuyó drásticamente en el momento en el cual cesaron los subsidios, causando un cambio hacia el carbón como combustible [27].

Uno de los pocos digestores domésticos instalado en Perú, un digestor tipo chino de 10 m³, costó alrededor de 1300 US \$ en el 1994. Desde entonces el precio de los materiales se ha casi duplicado, pudiendo estimar que en el 2007 el mismo digestor costaría más de 2000 US \$, valor inalcanzable para cualquier familia de la zona andina.

Las evaluaciones económicas pueden utilizar diferentes parámetros, y consecuentemente llegar a diferentes conclusiones. En este caso, el énfasis es puesto sobre el mínimo coste de instalación, para facilitar la difusión del digestor. Otros tipos de digestores operan más eficientemente la conversión de los residuos a biogás, y tienen una mayor vida útil: eventualmente pueden tener un menor coste respecto a la cantidad de energía producida, pero el alto capital inicial para la instalación hace inviable su difusión en la zona de investigación.

6) USO Y MANUTENCIÓN.

- El funcionamiento del digestor se entiende instintivamente, ya que es visible la cantidad de gas que es producida (como en el caso del digestor Hindú, y a diferencia del tipo Chino), y esto puede ayudar en la difusión y aceptación de la tecnología.
- La cantidad de trabajo para realizar la carga diaria depende de aspectos ajenos al tipo de digestor: tipo de establo, presencia de un pozo de mezclado y alimentación, posición del digestor en la topografía del predio rural, disponibilidad de agua, etc.
- A causa de su mayor fragilidad, el PTD necesita de mayores protecciones y cautelas para evitar que animales, niños, objetos, fenómenos atmosféricos puedan dañar su estructura.
- El usuario puede fácilmente reparar pequeños cortes y agujeros en el film plástico, siempre que sean identificables, aplicando algún tipo de cinta adhesiva o parches con pegamiento. Existen en comercio cintas adhesivas específicas para polietileno,



y pueden encontrarse en las distribuidoras de material para invernaderos. Son soluciones temporáneas y que no devuelven el PTD a su completa funcionalidad, y que pero son técnica y económicamente al alcance de cualquier usuario. Otra solución, dependiendo de la posición del daño, es de sumergir el corte o agujero dentro del líquido mediante algún tipo de objeto pesado.

- En el interior de cualquier digestor no mezclado van sedimentando sólidos inertes y no degradables. Con el tiempo esta capa puede llegar a ocupar una parte considerable del digestor, haciendo necesaria una limpieza del digestor. En el caso del PTD no es posible penetrar en su interior para vaciarlo de los sedimentos, por el riesgo que se dañe la estructura: es posible recurrir a soluciones más complicadas como bombeo, sifón a través de las bocas laterales, lavado con agua. Generalmente no hace falta afrontar el problema de los sedimentos a causa de la limitada vida útil del plástico.

7) VIDA ÚTIL. Es la desventaja más importante de los PTD. La vida útil del PTD coincide con la durada del film plástico. Sencillamente se puede decir que con el pasar del tiempo las características mecánicas del film plástico disminuyen, hasta que, literalmente, el plástico se hace tiras. Cualquier tipo de mantenimiento es entonces insuficiente y hace falta proceder a la sustitución de la manga. Otros eventos accidentales pueden abreviar aún más la durada del plástico: caída de objetos, rupturas causadas por animales, etc., justificando la necesidad de una protección eficiente del digestor. La vida útil del PTD es entonces determinada por los siguientes factores:

- Características químicas (tipo de polímero, aditivos contenidos) y grosor del film plástico;
- Numero de capas de plástico con las cuales se realiza el PTD. Generalmente se utilizan 2-3 mangas insertadas una dentro de la otra. Un mayor número de capas no parece aumentar proporcionalmente la vida del PTD, y se considera una solución ineconómica ([28], p. 22).
- Condiciones ambientales: temperatura, radiación solar, humedad, viento, lluvia, granizado.
- Protección del PTD de otros agentes externos: animales, rocas, piedras.
- Recolección y separación de la alimentación: ramas, piedras, y otros materiales puntudos contenidos en el influente pueden dañar el plástico desde el interior



Algunas experiencias [36][37], utilizando LPDE como material, reportan una durada del digestor de hasta cinco años; los digestores construidos con paredes en ladrillos y hormigón pueden alcanzar los 15-20 años [14], con una adecuada construcción y manutención. La sustitución del plástico permite seguir utilizando el resto de la instalación.

3.2. Mecanismos de la degradación del LDPE

El coste de las instalaciones realizadas en esta investigación es determinado en buena parte por el coste del film plástico [Tabla 6-4]: el film se utiliza para construir el PTD y el invernadero que lo protege y calienta. Los beneficios económicos de las instalaciones son entonces influenciados directamente por la durabilidad de los films.

El plástico del PTD es expuesto a diferentes ambientes. La capa externa del PTD por una parte está en contacto con el terreno (o el eventual material aislante) y en la parte superior con la atmósfera. La atmósfera en nuestro caso es el ambiente que se crea al interior del invernadero. La capa interna del PTD presenta una subdivisión análoga: en la parte inferior está en contacto con la mezcla orgánica, mientras en la superior con el biogás. Este esquema se complica ulteriormente considerando que el PTD es realizado con 2-3 capas de film plástico.

No existen en la literatura estudios conducidos sobre los mecanismos de degradación del plástico del PTD. Es posible pero utilizar las conclusiones de estudios análogos que tratan de la degradación de las coberturas de invernaderos [38][39], y de geomembranas [40]. Los resultados de tales estudios pueden servir como base para una mejor comprensión del comportamiento en el tiempo del film, y posiblemente para aumentar la vida útil del digestor y del invernadero.

El LDPE es un polímero semicristalino, con alta ramificación lateral, no polar, con altas resistencias a los agentes químicos, y baja permeabilidad a gases y líquidos [41]. Las propiedades mecánicas dependen del peso molecular medio, de la cristalinidad, de la ramificación y reticulación del polímero [38]. Parte de los film en LDPE para invernaderos son una coextrusión con 4-10% de EVA (etileno-acetato de vinilo), con propiedades mecánicas y térmicas ligeramente diferentes respecto al LDPE puro [38].

<i>Características</i>	LDPE
Densidad	0.910 - 0.935 g/cm ³



Cristalinidad	40 - 50 %
Temperatura fusión cristalina	95° - 130° C
Limite elástico	4.1 – 15.9 MPa
Modulo elástico	96.5 – 262 Mpa
Elongación a ruptura	90 – 800 %
Dureza Shore	41 – 50

Tabla 3-1. Propiedades mecánicas del LDPE [42]

	Valor de permeabilidad: $(\text{cm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{mm} / (\text{m}^2 \text{ film} \cdot \text{atm}_{\text{CH}_4} \cdot \text{día}))$			Perdidas al exterior en un PTD típico: $l_{\text{CH}_4} / \text{día}$. (Grosor film = 1mm, superficie = 5m ² , p_{CH_4} = 0.006 atm)		
	23° C	35° C	50° C	23° C	35° C	50° C
PE	345	760	2060	0,010	0,023	0,062
EPR	2870	6170	8930	0,086	0,185	0,268
PVC	195	365	805	0,006	0,011	0,024

Tabla 3-2 Permeabilidad al gas metano de diferentes membranas sintéticas (PE: polietileno, EPR: polietileno-polipropileno, PVC: polivinilcloruro). Datos de Edelman W., en: [43], p.210.

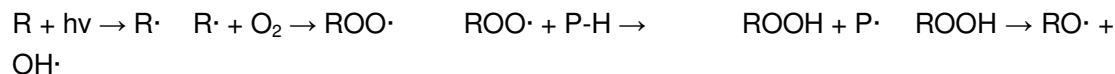
La permeabilidad del LPDE al metano no constituye un problema; más importantes son sus propiedades relacionadas a la durabilidad.

La totalidad de las rupturas estructurales parece ocurrir en la parte descubierta del PTD [35], y, excluyendo los eventos contingentes (animales, personas, objetos), las rupturas son causadas por el envejecimiento del film. Con el pasar del tiempo el comportamiento del film pasa de dúctil a frágil, y la resistencia a la tracción disminuye. La degradación ocurre sustancialmente en la fase amorfa. Dos mecanismos afectan principalmente la degradación del LDPE [38][39]: la foto-degradación y el estrés mecánico.

La exposición del plástico a la radiación solar afecta sus propiedades químicas, y consecuentemente las propiedades mecánicas. La radiación UV (290-400 nm) es la parte más energética del espectro solar, puede ser absorbida por el plástico y provocar rupturas de enlaces químicos. Los radicales que así se producen reaccionan ulteriormente con el oxígeno atmosférico causando una ulterior degradación del plástico. Este proceso se llama foto-oxidación y sigue el típico esquema de reacción radicalica: iniciación, propagación en cadena, terminación. En el LDPE puro no existen enlaces (como enlaces dobles) que



permitan el comienzo de la reacción radicalica. En el LDPE comercial existen impurezas, cromóforas, procedentes de su producción y uso, que pueden absorber la radiación UV, originando así los radicales que permiten el progresar de la foto-oxidación:



Los radicales $R\cdot$ reaccionan con el oxígeno dando peróxidos radicales $ROO\cdot$; estos reaccionan con las cadenas poliméricas, rompiendo el enlace covalente con el hidrogeno, y dando una cadena polimérica $P\cdot$ con un centro radical. El hidroperóxido $ROOH$ a su vez puede descomponerse otra vez en radicales que propagan la reacción foto-degradativa [38]. El proceso causa reticulación y ruptura de las cadenas poliméricas.

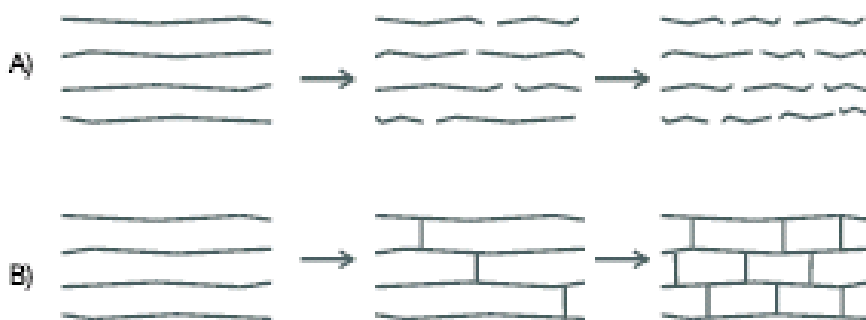


Ilustración 3-5. Efectos de la foto-degradación sobre las cadenas poliméricas [41]: A) ruptura; B) reticulación

La difusión del O_2 al interior del film plástico es la fase limitante de la reacción [39]. Aumentando el grosor del film plástico, aumenta el tiempo necesario al O_2 para difundir a través de ello, y entonces aumenta su durabilidad. El grado de foto-oxidación cambia también entre las capas sucesivas de film del PTD. La primera capa, externa, va a ser la más expuesta al proceso oxidativo. Las capas interiores reciben menos radiación UV (una parte siendo absorbida por las capas precedentes) y al mismo tiempo disminuye la concentración de O_2 (a causa de la difusión del biogás): por estas razones la velocidad de foto-degradación disminuye progresivamente en las capas interiores¹.

¹ Algunos agroquímicos conteniendo azufre, se reportan como dañinos para la estructura del LPDE[38], pero no se han encontrado estudios sobre la influencia del H_2S , que es componente menor del biogás. El vapor de agua, que es presente en saturación en el biogás, puede dar radicales hidroxilos. A causa de su carácter ácido (CO_2 y H_2S) el biogás puede también reaccionar



Existen en comercio film en LDPE adicionados con sustancias que aumentan la resistencia a la foto-degradación. Los aditivos pueden dividirse en cuatro clases [41]: pigmentos, absorbedores de UV, “quenchers”, desactivadores de radicales libres. Pigmentos y absorbedores actúan como defensas, absorbiendo la radiación UV antes que pueda reaccionar con otras moléculas sensibles. Los “quenchers” desactivan los estados excitados de las moléculas, evitando la formación de radicales libres. Los desactivadores de radicales libres son antioxidantes y limitan la concentración de radicales libres: entre los más efectivos se encuentran los HALS (hindered amine light stabilisers) [39]. Bui Xuan [36], reporta una durada doble de los PTD construidos con LPDE adicionado con HALS (Chimassorb 994 de CIBA-GEIGY) respecto a los PTD con LDPE sin adictivos.

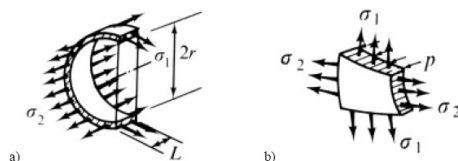
La presión del líquido y del gas al interior del PTD induce una tensión mecánica en el film. La tensión máxima soportable por el film es función del límite elástico del material, de la presión del biogás y del radio de curvatura del PTD¹. En la instalación del PTD se usan válvulas de seguridad para evitar presiones excesivas del biogás. La tensión pero también tiene influencia sobre la degradación en el tiempo del film, en dos maneras [38]:

- Directamente, causando un movimiento (slippage) de las cadenas poliméricas: las cadenas se orientan en la dirección de la tensión, y se reorganizan en fase cristalina, aumentando así la fragilidad de la membrana. En menor grado ocurren también rupturas de las cadenas.
- Indirectamente, aumentando la velocidad de las reacciones degradativas de tipo químico, como la foto-oxidación: la tensión aumenta la reactividad de las macromoléculas y la difusión de los reactivos (ej.: oxígeno) al interior del film.

Las características ambientales, y en particular temperatura, radiación solar y humedad, influyen la velocidad de los mecanismos de degradación. Menor importancia parece tener la degradación microbiana (baste pensar a la dificultad de degradación de los plásticos en los rellenos sanitarios). Altas temperaturas (superiores a los 100° C) aumentan

con los HALS (básicos) presentes en el film[38], originando sales solubles que disminuyen la protección de los UV. Ulteriores estudios son necesarios para evaluar la foto-degradación en presencia de biogás.

¹ En un contenedor cilíndrico la tensión σ_1 perpendicular al radio (hoop stress) es dada por $\sigma_1=p \cdot r/h$, la tensión longitudinal por $\sigma_2=p \cdot r/2h$ donde p es la presión del fluido, r el radio del cilindro, h el grosor de la pared del cilindro [44].



la frecuencia con la cual ocurren rupturas espontáneas en las cadenas poliméricas, causando la depolimerización del plástico que así pierde sus propiedades de elasticidad y resistencia a la tracción. En los invernaderos se pueden alcanzar temperaturas máximas de 80 °C en las zonas de contacto entre el plástico y la estructura metálica del invernadero [39], así que la degradación térmica, definida como antes, no es particularmente importante. Al contrario la temperatura es determinante sobre la velocidad de las reacciones foto-oxidativas: altas temperaturas y variaciones cíclicas de la misma (día-noche) causan un incremento de la velocidad del proceso [38]. Según Rabek (1995, citado en [39]), la velocidad de foto-oxidación se duplica por cada aumento de 10° C.

El altiplano andino presenta especiales condiciones de irradiación solar que lo califican como una de las regiones más soleadas del planeta, a causa de su altitud y latitud, con valores medios de 850-890 W/m² ([45], p.100). Estas condiciones de irradiación, y entonces mayor intensidad de UV, aceleran aún más la degradación del plástico.

Las lluvias, y la humedad que condensa sobre el film, causan la extracción de los aditivos solubles en agua contenidos en el plástico, disminuyendo así su protección.

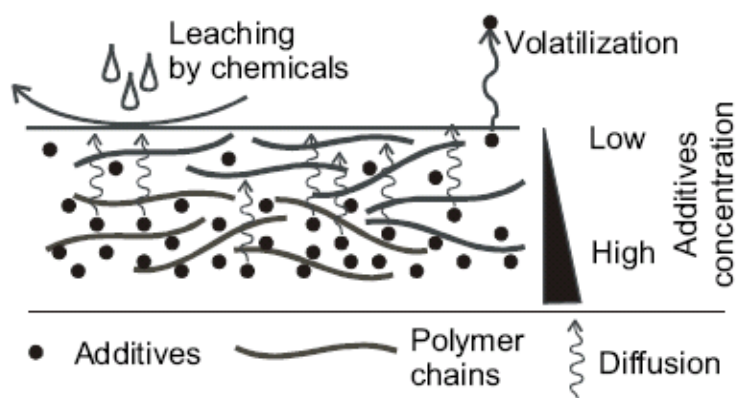


Ilustración 3-6 Volatilización y lixiviación de los aditivos estabilizadores [41].

La humedad, a contacto con el film, puede también provocar una degradación fotoquímica: se generan radicales hidroxilos u otras especies reactivas que promueven reacciones radicalicas [38]. Otros estudios reportan pero un efecto contrario: Nijskens *et al.* (1990, citado en [38]) condujo una experiencia sometiendo dos film en LDPE a radiación UV, con y sin ciclos de lluvia, y mostró como el agua fuera inhibidora del proceso de degradación. Una experiencia en el uso del PTD, contenida en [36], reporta como la cristalización-fragilización del LPDE sea siempre menor en las zonas del film en contacto con el líquido en digestión. Estos efectos de inhibición pueden deberse a la inercia térmica del agua, que evita así que la temperatura del plástico suba excesivamente. Sería interesante evaluar más exactamente el efecto global del agua sobre la degradación del plástico (considerando



también la lixiviación de los adictivos). En el caso se demostraran sus propiedades inhibitoras, sería posible modificar la instalación del PTD consecuentemente, intentando mantener una capa húmeda sobre los varios film. Dos soluciones posibles:

- Poner contenedores con agua al interior del invernadero: el agua evapora, condensando sobre la cara interna del invernadero; las gotas caen sobre el PTD, que así igualmente se mantiene húmedo.
- Es posible poner agua entre las capas (mangas) plásticas que forman el PTD: basta un punto de entrada, y luego el agua se mueve por capilaridad. En una de las instalaciones realizadas en Yanaoca, el espacio contenido entre las dos mangas que constituían el PTD, vino ocupado rápidamente por una sutil capa de líquido. Tal líquido probablemente provenía de un pequeño agujero en la manga interna, y por capilaridad ocupó casi enteramente el espacio entre las dos mangas.

3.3. Almacenamiento del biogás

La producción de biogás es continua, mientras su uso es discontinuo: típicamente se cocinan tres comidas diarias y de noche no hay uso de biogás por periodos de 10 -12 h. Entonces hace falta completar la instalación con un tanque para acumular el biogás que se produce durante los periodos de inutilizo. El mismo PTD puede funcionar como acumulador de biogás, pero no es una buena solución: el funcionamiento de los quemadores requiere una cierta presión del flujo de biogás, y no siempre la presión al interior del PTD puede ser suficiente, sobre todo cuando sea instalado lejos de la cocina. Es posible aumentar la presión poniendo pesos sobre el PTD, pero es una práctica arriesgada ya que puede dañar el film plástico. Por estas razones generalmente se instala un tanque suplementario más cerca a la cocina, dotado de algún sistema que permita mantener constante la presión de suministro del biogás al quemador. Una presión constante permite optimizar el funcionamiento de los aparados alimentados a biogás, situación que por ejemplo no se consigue con digestores a cúpula fija y con en el mismo PTD, donde la presión depende del contenido de biogás acumulado en el digestor.



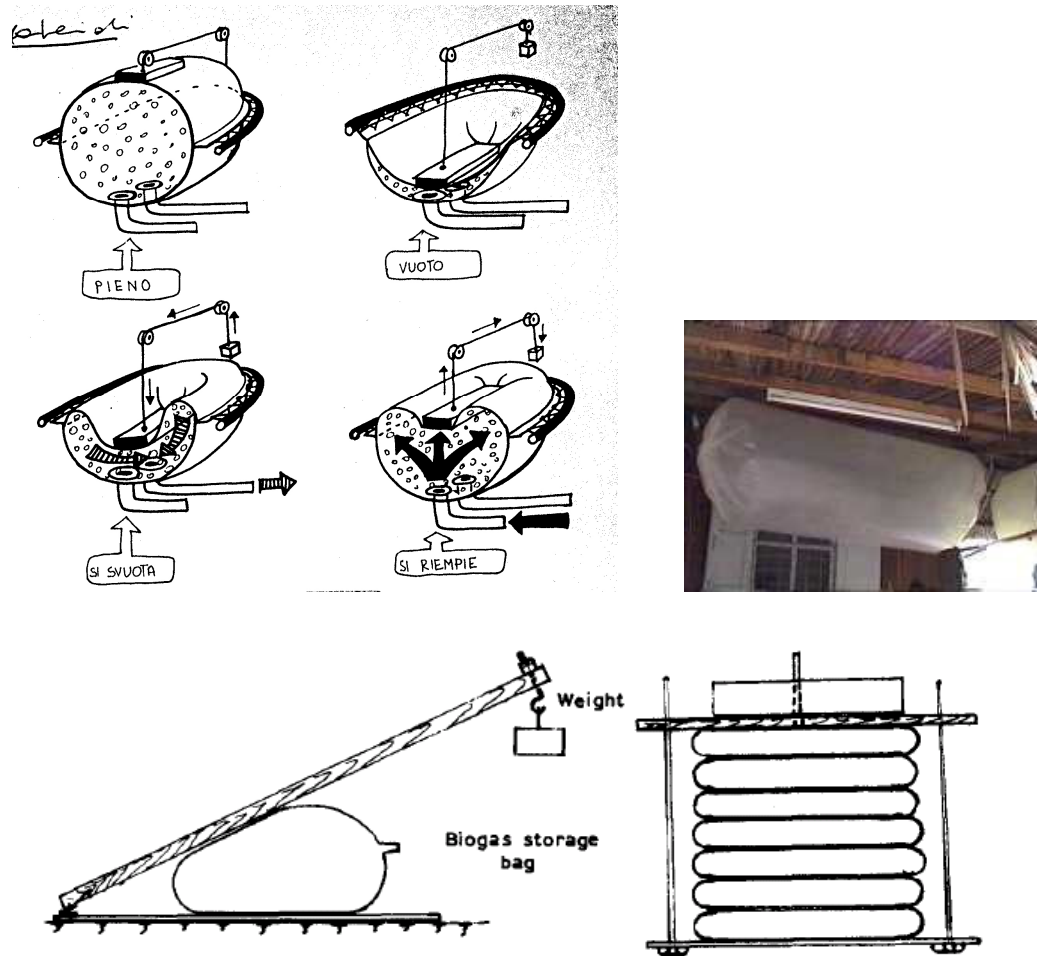


Ilustración 3-7 Diferentes tipologías de almacenamiento del biogás con bolsas plásticas [28][46][47].

3.4. Seguridad de la instalación

El metano, en concentraciones entre el 5 y 15% vol., forma mezclas explosivas con el aire [90]. Incluso antes de llegar a tales concentraciones, puede verificarse asfixia por exceso de CO_2 (concentraciones superiores al 4% vol. son consideradas inmediatamente peligrosas para la salud). Aún más peligrosa puede ser la presencia de H_2S , que a una concentración de 1000 ppm (0.1% vol.) puede resultar letal en pocos minutos: son numerosos los casos de trabajadores muertos en operaciones de limpieza de instalaciones para el tratamiento anaeróbico, literalmente investidos por nubes tóxicas [48]. Además el sistema olfativo deja de percibir el clásico olor de huevos putrefactos cuando las concentraciones de H_2S sean por encima de los 1-3 ppm [49], pudiendo así engañar sobre la presencia o menos de biogás en el ambiente. Es importante entonces que sea el



digestor que la bolsa de almacenamiento vengán instalados en zonas ventiladas o sin acceso para el hombre, para evitar un acumulo peligroso de sustancias inflamables y tóxicas en caso de fugas. El usuario debe ser conciente del riesgo que conlleva el utilizo del biogás, sobretodo en relación al utilizo de los aparatos domésticos (quemadores, lámparas).





4. Influencia de las condiciones climáticas del altiplano

La digestión anaeróbica de los residuos rurales para la producción de biogás es un argumento ampliamente estudiado. La mayoría de los estudios se refiere a zonas con climas cálidos y a nivel del mar, donde es posible conducir eficientemente la AD en reactores no calentados. Al contrario son menores las experiencias de generación de biogás en climas fríos y a altitudes mayores. En la literatura se encuentran solo dos estudios que tratan de experiencias conducidas en el altiplano andino [21][50], y ambos a escala de laboratorio. No se conoce algún caso de digestor instalado y en función en el altiplano andino peruano.

Las características de la zona andina que pueden afectar el funcionamiento de la AD son:

- Presión atmosférica: 0.622 – 0.609 atm a una altitud de 4000 m. Son valores teóricos calculados respectivamente en el caso de una atmósfera isoterma a 15° C y en el caso de una variación lineal de la temperatura de -0.0065° C/m [51].
- Intensidad de la radiación solar: promedio anual 6 - 6.5 kWh / m² / día [52], intensidad máxima 850 – 890 W / m² [45].
- Tipo de alimentación del ganado y composición de las excretas.
- Disponibilidad de agua.
- Temperatura: promedio máximo anual 20° C, mínimo 3° C ([52], para la provincia de Combapata, confinante con la provincia de Yanaoca).

En principio la menor presión determina una menor disolución de CO₂ en la mezcla, causando un mayor pH del líquido y una mayor concentración de CO₂ en el biogás. Alvarez *et al.* [21] condujeron experimentos de AD a diferentes presiones (1 atm, 0.65 atm) sin encontrar diferencias significativas en la producción de biogás.

Los valores elevados de radiación solar representan un recurso en el caso se utilicen como fuente de energía térmica para el calentamiento del digestor, y una amenaza para la durabilidad de los materiales plásticos usados en la instalación [apartado 3.2].

La disponibilidad de agua afecta la posibilidad de preparar una mezcla con la adecuada concentración en sólidos. Es un aspecto que depende del microclima (precipitaciones



atmosféricas), de la presencia de manantiales y de las estructuras hídricas presentes, y va evaluada caso por caso.

4.1. Influencia de la temperatura y de la radiación solar

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la AD, y la producción de metano es fuertemente dependiente de la T al interno del digester. La mayor parte de los digestores operan en el rango mesofílico y las características de este proceso han sido ampliamente estudiadas y documentadas. La mayor parte de los estudios documentan una marcada disminución en la producción de metano al disminuir de la temperatura [Ilustración 4-1]. Nótese que esto es el comportamiento mostrado por las bacterias mesofílicas: todos los digestores que se inoculan con estiércol vacuno o rumen contienen bacterias de este tipo. En el rumen la temperatura es de 39°C, óptima para la actividad de estas bacterias. Cuando se encuentran en un ambiente con temperatura más baja, sufren un largo proceso de selección y adaptación durante el cual su actividad baja drásticamente. Esto explica el comportamiento de los digestores instalados en zonas caracterizadas por fuertes diferencias de temperatura estacionales, donde cada invierno la producción de biogás puede llegar a pararse [53]. El resultado de la selección es un grupo de bacterias mesofílicas psicrófilas [53]. Diferentes son las bacterias psicrófilas que solo en los últimos años han empezado a ser objeto de estudio.

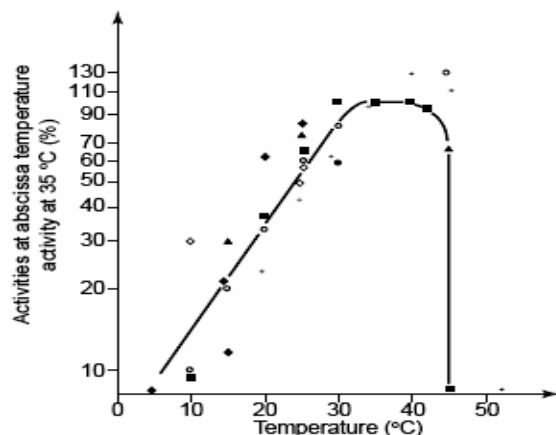


Ilustración 4-1 Relación entre la temperatura y la actividad de las bacterias mesofílicas ([20], compilación de diferentes estudios).

Singh *et al.* [54] elaboró un sencillo modelo para prever la producción de biogás en plantas no calentadas, con estiércol bovino como sustrato:

$$V_{CH_4} = M_v \cdot \left(a(T) + \frac{b(T)}{HRT} \right)^{-1} \quad (\text{ec. 4.1})$$



donde V_{CH_4} es el volumen de metano producido diariamente ($l_{CH_4}/día$), M_v los VS alimentados diariamente (kg VS/día), HRT el tiempo de retención (días) y $a(T)$ y $b(T)$ parámetros dependientes de la temperatura del lodo. El modelo es sencillo porque no prevé fenómenos de sobrealimentación y de inhibición.

Temperature (°C)	$a(t)$	$b(t)$
15	0.004935153	0.7057753
20	0.00828995	0.2596828
25	0.007090962	0.1500529
30	0.004901056	0.1174662
35	0.003726025	0.09628567

Tabla 4-1 Parámetros para el modelo de Singh (ec. 4.1), en función de la temperatura.

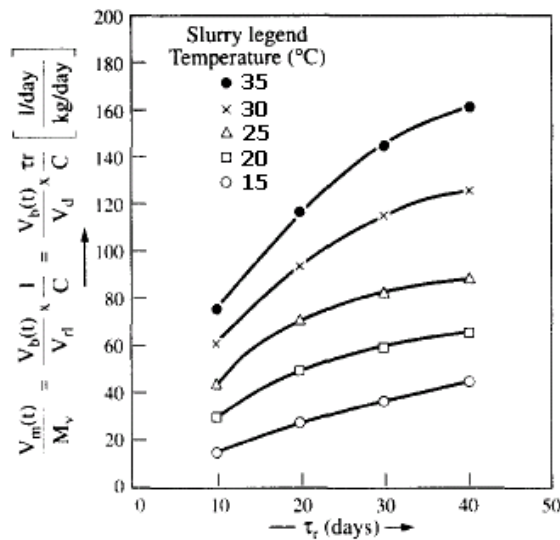


Ilustración 4-2 Rendimiento de la AD ($l CH_4/kg VS$ alimentados), con estiércol bovino, en función de temperatura y tiempo de retención. Modelo elaborado por Singh *et al.* [54]

La temperatura al interior de un digestor no calentado es función de diferentes factores:

- Flujos de calor a través de las paredes y superficie del digestor: dependen de la temperatura del aire y del suelo, de la geometría del digestor, del material de construcción, del tipo y cantidad de aislamiento.
- Intensidad de la radiación solar y superficie del digestor expuesta.
- Diferencia de temperatura entre influente y efluente del digestor.



- Calor latente de evaporación que se pierde en el flujo de biogás al exterior.
- Generación de calor al interior del digestor: a través de la oxidación aeróbica del sustrato (la alimentación siempre lleva una cierta cantidad de O₂) y del calor entálpico de la degradación anaeróbica.

La generación de calor es mínima respecto a las pérdidas de calor hacia el exterior y a las diferencias entálpicas entre alimentación y efluente, y generalmente no se considera en los cálculos de instalaciones familiares. Fenómenos de self-heating de las plantas son raros y circunscritos a instalaciones de grande volumen y con alimentaciones ricas en carbohidratos (papas, maíz...) [55].

En los digestores enterrados hay una estrecha relación entre la temperatura del aire, la temperatura de la tierra y la temperatura del digestor. El lodo de fermentación se ve afectado directamente por la temperatura de la tierra, que se altera con la de la atmósfera.

	Enero					Julio				
Fecha	3	9	16	23	30	3	10	17	24	31
Temperatura atmosférica del día (°C)	2.5	6.3	- 1.3	11.4	3.0	33.2	32.3	28	28.9	27.4
Temperatura de la tierra a 30 cm de profundidad (°C)	6.5	8	6.5	7.5	6.5	31	32.5	30.5	29	28
Temperatura de la tierra a 100 cm de profundidad (°C)	11	11	10	8.5	9.5	25	26	27	26	26
Temperatura de la tierra a 190 cm de profundidad (°C)	14	13	13	11	11	21	21	21.5	21.5	23
Temperatura media de los lodos (°C)	13.5	11.5	11.5	11.5	11.5	21	21.5	22	22	22.5

Tabla 4-2 Relaciones entre las temperaturas de tierra, aire y lodo para un digestor tipo chino profundo 190 cm [56].

Mientras más profundo bajo tierra esté el digestor, menos variará la temperatura de los lodos y se ensanchará la diferencia entre la temperatura de la atmósfera y la del digestor. Al contrario, mientras más cerca esté el digestor a la superficie, mayores serán las variaciones en la temperatura de los lodos y más se acercarán a la temperatura del aire. Kanwar [57] confrontó el comportamiento de un digestor a cúpula fija y un PTD en una zona montuosa de la India, alimentando con estiércol ganado. La producción media anual del PTD fue el 75% de la producción conseguida con el digestor de cúpula fija; el PTD



mostró una mayor fluctuación de temperatura con relativa disminución en la producción de biogás en los meses invernales. El comportamiento se debe a la mayor superficie expuesta al aire del PTD y por ende a las mayores pérdidas de calor en los periodos fríos.

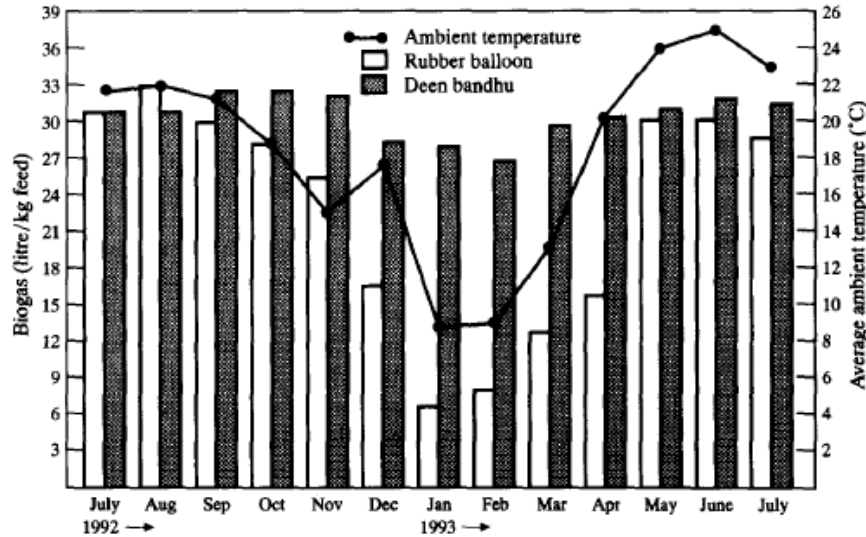


Ilustración 4-3 Producción media diaria (l biogás/kg de estiércol húmedo) en un digestor PTD y uno de cúpula fija [57].

La mayor parte de los PTD ha sido instalado en zonas con clima tropical: Vietnam, Camboya, Filipinas, Tanzania, etc. [35][29][37]. En estas zonas la temperatura del lodo alcanza temperaturas medias de 24 – 28° C, situándose en la parte media del rango mesofílico, y consiguiendo producciones de biogás bastante elevadas (hasta 1.2 m³ biogás/m³ lodo/día, utilizando estiércol porcino [58]).

En la zona andina, y en particular en la zona de la investigación, la temperatura media anual es mucho más baja, entre 8 y 10° C, y no hay grandes variaciones de temperatura entre verano y invierno (más bien se puede hablar de temporada seca y temporada de lluvias). Se puede figurar que en estas condiciones climáticas la temperatura media de los lodos difícilmente podría superar los 10 – 12° C¹. La producción de biogás a estas temperaturas es todavía posible, pero con tasas extremadamente bajas. Alvaréz *et al.* [21] conduciendo un experimento de digestión de excrementos ganados del altiplano boliviano a



la temperatura de 10° C, obtuvo una productividad tan baja como 0.02 – 0.04 m³ biogás/m³ lodo/día.

La solución típica para aumentar la producción de metano en zonas frías ha sido la de aumentar la temperatura de digestión, mediante diferentes tecnologías:

- Intercambiadores de calor al interno o en las paredes del digestor. Generalmente se usa agua como fluido térmico, y como combustible parte del biogás generado. Si se dispone de un motor en función, se puede usar su calor residual.
- Intercambiadores de calor, pero utilizando colectores solares para recalentar el fluido térmico. En los colectores puede recircularse directamente el líquido en digestión, mezclando el contenido del digestor pero con riesgos de “baking” en los colectores y obstrucción de las tuberías. Axaopoulos *et al.* (2001, [59]) presenta el diseño, y su modelo matemático, de un digestor plug-flow con cobertura en plástico y con el colector solar que funciona como techo para la protección del plástico. En los digestores enterrados siempre se necesita de una bomba para la circulación del líquido.

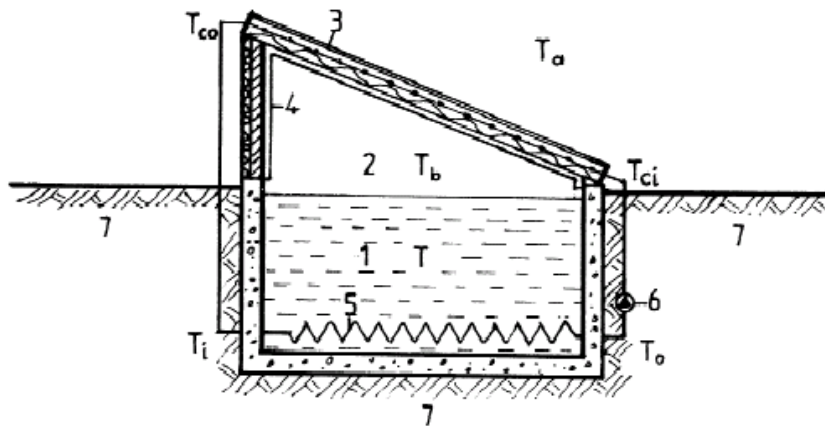


Ilustración 4-4. Corte transversal de un digestor plug-flow con cobertura en plástico (4), y colector solar (3) para el calentamiento del lodo mediante intercambiador (5) [59].

- Construyendo un invernadero que cubra por entero el digestor.

¹ Precedentemente se ha visto como los flujos térmicos con el exterior (aire, suelo) sean determinantes por la temperatura de equilibrio de un digestor. La no elevada profundidad de un PTD familiar bajo tierra (< 1.3 m) determina una escasa influencia de efectos geotérmicos.



- Pre calentando la alimentación, así de ingresar calor al interior del digestor: se puede añadir agua caliente para diluir el sustrato, o dejar la mezcla a calentarse con la radiación solar diurna antes de alimentarla (posiblemente por efecto invernadero).
- Poniendo una capa de aislante entre las paredes del digestor y el suelo. Paja, aserrín, lana son óptimos aislantes y disponibles en zonas rurales.
- Utilizando una tapa móvil para cubrir la superficie del digestor durante las noches y los periodos fríos y no soleados del año.

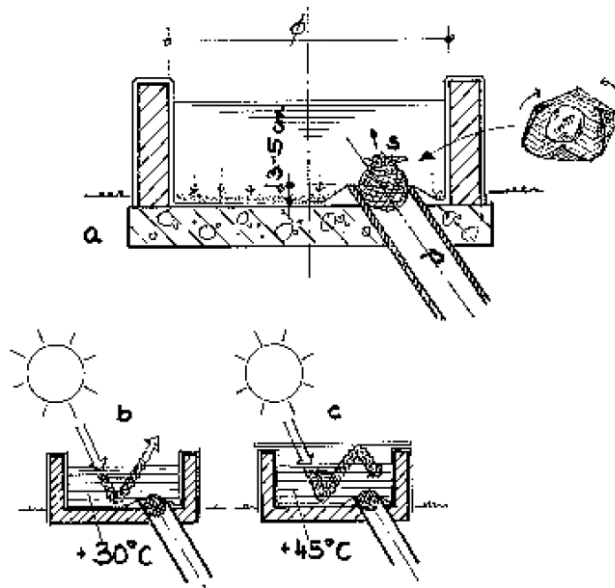


Ilustración 4-5 Tanque de mezcla del sustrato, puede ser utilizado para pre-calentar la alimentación [26].

El utilizo de intercambiadores de calor, y sobre todo su variación con energía solar, puede ser considerado en el caso de instalaciones medio-grandes: en granjas, mataderos, queserías, etc. En instalaciones familiares el mayor coste inicial de un intercambiador y de la bomba difícilmente sería al alcance del usuario. Además bomba y tuberías podrían necesitar de una especial manutención, material y técnica, que es difícil encontrar en las comunidades más alejadas.

Las otras soluciones pueden ser implementadas con menor impacto sobre el coste inicial y en todos los casos su construcción no requiere de particulares conocimientos técnicos. El pretratamiento de la alimentación es seguramente recomendable cuando se pueda aprovechar económicamente la energía solar. En una instalación familiar se pueden necesitar 20 – 50 litros de agua diaria para diluir el sustrato; una parte puede calentarse fácilmente mediante el utilizo de algún sencillo colector solar. El aislamiento depende de los materiales que se pueden encontrar localmente y de su precio. Para ser efectivo, el grosor



del aislante debería ser de al menos 10 cm. La cantidad necesaria puede ser bastante elevada y aumentar el coste de la instalación [Tabla 6-8]. A continuación se discute el funcionamiento del invernadero y de la tapa móvil, y la decisión de utilizarlos en las instalaciones realizadas.

4.2. Calentamiento del PTD a través de un invernadero

En la literatura se encuentran algunos estudios [60][61][62] sobre el uso de coberturas plásticas (invernaderos) para aumentar la temperatura del digestor. Los estudios fueron conducidos con digestores a cúpula flotante, y entonces sus resultados, y los modelos matemáticos propuestos, no pueden ser utilizados directamente para el caso del PTD. Todos los investigadores convergen en afirmar la eficiencia del invernadero en aumentar la producción de biogás respecto a las instalaciones convencionales (hasta un 100% más en [61]). Igualmente es recomendado el uso de alguna forma de aislamiento móvil de las partes expuestas del digestor durante las horas nocturnas.

La eficiencia del invernadero para calentar el lodo, dependerá evidentemente de una serie de parámetros. Mediante un análisis térmico de la instalación, considerando las propiedades térmicas y radiométricas de los materiales y las condiciones climáticas, sería posible encontrar valores óptimos para estos parámetros. Este análisis es fuera de los alcances de esta investigación, y aquí solo se da una descripción cualitativa de la influencia de algunos parámetros y de la importancia de algunos factores ajenos al aspecto térmico.

Dimensión del invernadero. Hay básicamente dos opciones posibles. La primera es construir un invernadero más grande del PTD, aprovechando el espacio restante para cultivos. En China, en las regiones más frías, se está difundiendo un sistema análogo, llamado “4 en 1” que integra en una única instalación, letrina, recinto para cerdos, digestor, espacio para cultivos [63]. En estos sistemas el digestor es de cúpula fija y es instalado bajo el espacio dedicado a los cerdos [Ilustración 4-6].

Dadas sus dimensiones, el sistema presenta una gran inercia térmica que reduce las fluctuaciones de temperatura durante la noche. Este tipo de sistema es aconsejable cuando sea justificado económicamente, por ejemplo utilizándolo de manera comunitaria para abaratar las inversiones individuales, como ya se hace en algunas comunidades andinas para la gestión y construcción de grandes invernaderos. En el caso se instale un sistema para la separación de la CO_2 contenida en el biogás, se puede ventilar la CO_2 al interior del invernadero para aumentar el crecimiento de los vegetales. Alimentación y salida del PTD deberían estar fuera del invernadero para no complicar la operación de carga y para evitar malos olores.



Este tipo de sistema presenta pero una importante contraindicación, debido a su falta de seguridad. En el caso de fugas continuadas, o rupturas improvisas de algún elemento de la instalación (plástico, tuberías), un ambiente con escasa ventilación como es el invernadero, sobretodo de noche, permite la acumulación de biogás a niveles peligrosos [apartado 3.4.]. Es posible ventilar el ambiente por al menos una hora antes de entrar, pero esto podría resultar empalagoso para las actividades diarias. Son disponibles sensores electrónicos que avisan en caso de concentraciones excesivas, pero con alto coste. Una solución puede consistir en aislar un espacio dedicado al PTD al interior del invernadero, mediante una cortina plástica transparente, adecuadamente sellada a paredes y terreno, y enterrando las tuberías del biogás.

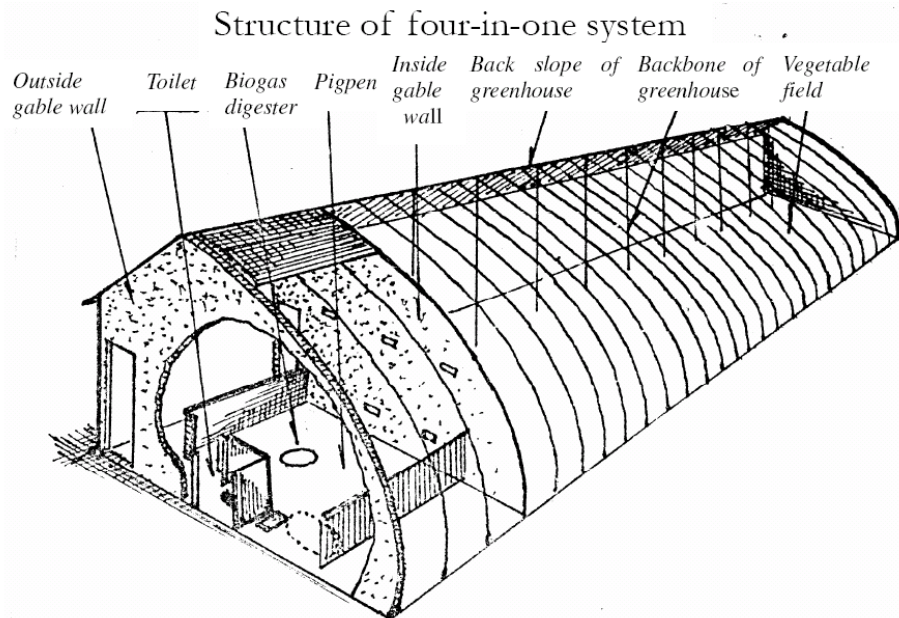


Ilustración 4-6 Sistema integrado “4 en 1” [64].

La otra opción, inversa, es de construir un invernadero de dimensiones reducidas, tipo túnel, que siga el perfil del PTD. La inercia térmica es obviamente menor, pero disminuye la necesidad de materiales. Es intrínsecamente seguro porque no permite la entrada de hombres.

Pérdidas de calor. El comportamiento térmico del invernadero depende fuertemente del tipo y condiciones (húmedo/seco, nuevo/deteriorado) del material empleado [65]. Para cada material, fijadas las condiciones ambientales, se puede encontrar un coeficiente K (W/m^2K) que describe globalmente su comportamiento térmico (conducción, convección, radiación). En nuestro caso el objetivo principal es limitar las pérdidas de calor durante la noche, y entonces utilizar un material con un bajo valor de K . La mayoría de los invernaderos construidos en la zona de investigación, utiliza film en polietileno para la cobertura, a causa



de su bajo coste y facilidad de instalación. Los valores de K para el PE y otros materiales de cubierta se presentan en la [Tabla 4-3]: son valores calculados teóricamente y para una condición ambiental que no se aleja demasiado de aquella de las noches del altiplano andino. En estas condiciones la mayor parte de calor se pierde a través de mecanismos radiativos.

Walls	T_{11} (°C)	T_{12} (°C)	Radiative ($W m^{-2}$)	Convective ($W m^{-2}$)	Total ($W m^{-2}$)	k ($W m^{-2} K^{-1}$)
PE	-3.9	-3.9	180	90	270	9.0
EVA	-3.5	-3.4	138	97	235	7.8
PVC	-3.4	-3.4	131	97	228	7.6
Reinforced PVC	-3.4	-3.2	101	97	198	6.6
Horticultural glass	-3.5	-2.5	86	96	182	6.1

Tabla 4-3. Temperaturas superficiales, flujos de calor radiativos y convectivos y K para diferentes materiales de cubierta. T externa = $-10^{\circ}C$, T externa radiativa = $-28^{\circ}C$, T interna = $20^{\circ}C$, cielo despejado, velocidad del viento = $4m/s$, [66].

El PE presenta el comportamiento peor debido a su alta transmitividad T a la radiación térmica ($T_0=77\%$), mientras vidrios y policarbonatos son prácticamente opacos [66]. Existen pero en comercio formulaciones diferentes del PE, contenientes aditivos o copolímeros que modifican, entre otros, su comportamiento a la radiación térmica: el EVA (etileno-acetato de vinilo) tiene $T_0= 13-51\%$; el PE con tratamiento a los IR, $T_0= 12 -42\%$ [65]. En Papadakis *et al.* (2000, [65]) es presente un vasto elenco de las propiedades térmicas de los materiales más difundidos para invernaderos.

En el caso de paredes dobles, con aire en el medio, los valores de K disminuyen entre el 30 – 40 % para todos los materiales, sobre todo debido a la reducción en los flujos convectivos [66]. El espacio entre las paredes debe ser superior a los 20 mm para evitar la influencia de la conducción.

La presencia de vapor de agua al interior del invernadero, aumenta la absorbancia del aire, aumentando la temperatura durante las horas diurnas, y limitando las pérdidas radiativas durante las nocturnas. En Sodha *et al.* [61], aumentando la absorbancia de 2 a 8%, la temperatura máxima al interior del invernadero pasó de 36° a $56^{\circ}C$. Durante las horas nocturnas la humedad condensa sobre las paredes frías, cediendo al exterior su calor latente. Al mismo tiempo pero, la presencia de una capa de agua altera las propiedades de la pared que cubre. En un ensayo [66], la trasmittancia al infrarrojo lejano (3 – 16 μm) del PE disminuyó con una película aguosa de 1 mm de grosor, y se anuló llegando a los 3 mm de grosor, disminuyendo así las pérdidas radiativas.

La presencia de estructuras (construcciones, árboles, recintos) cerca del PTD, disminuyen la intensidad del viento incidente y por ende las pérdidas de calor convectivas.



La construcción del invernadero debe ser realizada con cura, evitando dejar fisuras a través de las cuales pueda ocurrir el paso de aire y humedad: las pérdidas por ventilación son las más importantes después de las radiativas y convectivas.

Sistemas de calefacción pasiva. En las prácticas agrícolas se utilizan diferentes sistemas para disminuir el consumo de energía destinado a la calefacción del invernadero: sistemas de acumulo de calor (agua, "rock bed"), muro norte, cambio de fase, cortinas térmicas [67][68]. El uso de cortinas térmicas es uno de lo más prácticos y efectivos [67]. Se utilizan durante las horas nocturnas, extendiéndolas al externo o al interno del invernadero [Ilustración 4-7]. Deben ser realizadas con material opaco a la radiación térmica. Su efecto es lo de aumentar la resistencia térmica del sistema, sea bloqueando la transmisión de la radiación térmica, sea cortando las corrientes convectivas.

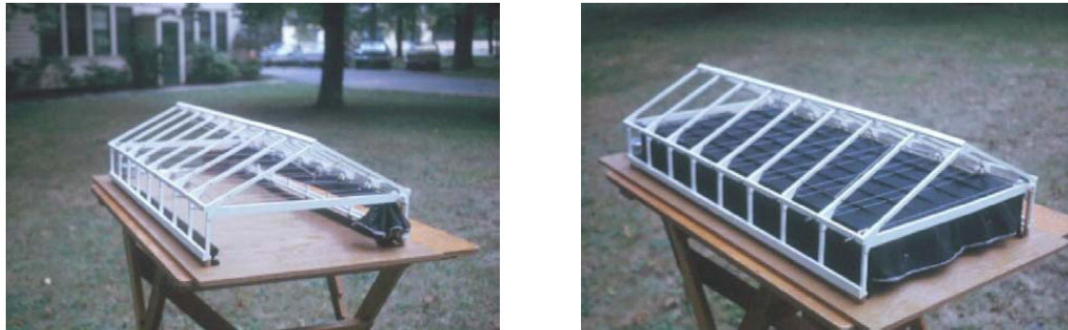


Ilustración 4-7 Maqueta de un invernadero con cortinas térmicas [69].

En Anand *et al.* [70], se describe una practica sencilla para aumentar la temperatura del lodo, y que puede ser adoptada con provecho con o sin invernadero. Se mezcla carbón vegetal (250 g) con 15 litros de biol; la mezcla negra obtenida se desparrama en el suelo en una banda de 1 m de ancho alrededor del digestor. Tal cobertura puede durar un mes y medio, en ausencia de lluvias. Los resultados mostraron un aumento medio en la producción de gas del 10% respecto a los digestores de control, a causa de la mayor temperatura del terreno.

Geometría del PTD. La zanja que contiene el PTD generalmente tiene una profundidad igual al diámetro de la manga plástica [28]. Para aprovechar mayormente la intensa radiación solar y el microclima creado por el invernadero, es posible modificar la relación entre ancho y profundidad de la zanja, al fin de aumentar la superficie expuesta del PTD y por ende el calor acumulado por el lodo. No es aconsejable aumentar demasiado dicha relación [Ilustración 4-8, c):

- La campana donde se acumula el gas es mucho más plana: a paridad de presión del biogás, en esta disposición es mayor la tensión que sufre el plástico



- Aumentando el ancho de la zanja, hace falta aumentar también el diámetro de la alimentación, para asegurarse que efectivamente haya un movimiento plug-flow de todo el lodo, y no solo de la parte central.
- Una parte mayor del lodo sufre fluctuaciones térmicas (día-noche) que son incompatibles con la estabilidad de la AD.

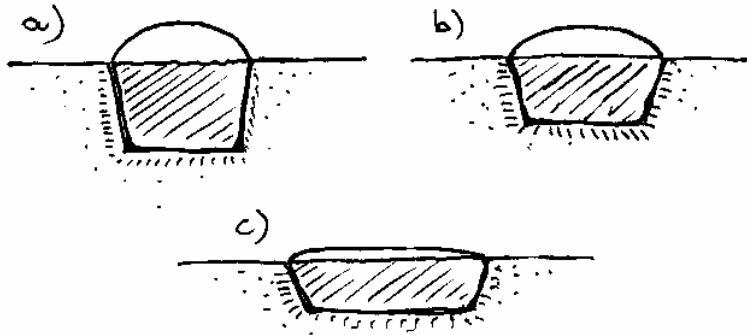


Ilustración 4-8 Diferentes aspectos del PTD al cambiar las relaciones geométricas de la zanja.

4.3. Operación del digestor tubular

Dimensionamiento y manejo de los digestores dependen de cual sea la prioridad de la AD en cada situación particular:

- Control del impacto ambiental de algún tipo de residuo orgánico.
- Producción de fertilizante y condicionador de suelos.
- Producción de biogás como combustible.

En el caso de la presente investigación el interés principal es en la producción de biogás como combustible para la cocción de alimentos a escala familiar. Los otros objetivos no cesan de ser satisfechos, pero donde sea posible los parámetros de la AD serán modificados en vista de conseguir una máxima producción de biogás.

Durante la fase de diseño de un digestor generalmente se usan ecuaciones cinéticas para prever la producción de biogás. No es en las finalidades de esta investigación una revisión de los modelos disponibles. Aquí se presenta el modelo cinético de Chen y Hashimoto (1978, presentado en [43], p. 192 – 200), que algunos estudios [71] utilizan como base para



la descripción de la AD a baja temperatura, hidrólisis como etapa controlante y crecimiento bacteriano suspendido, condiciones que coinciden con las de la presente investigación. A través del modelo se puede tener una indicación de los efectos de los varios parámetros sobre la producción de metano:

$$\dot{V} = \frac{B_0 \cdot S_0}{HRT} \cdot \left(1 - \frac{K}{(HRT \cdot \mu_m - 1 + K)} \right)$$

$$\mu_m = 0.013T - 0.129 \quad (\text{ec. 4.2})$$

$$K = 0.8 + 0.0016e^{0.06S_0}$$

- \dot{V} = producción volumétrica de CH₄ [m³_{CH4}/m³_{LODO}·día]
- B₀ = potencial bioquímico del sustrato [m³_{CH4}/kg VS]
- S₀ = concentración en VS del influente [kg VS/m³]
- HRT = tiempo de retención hidráulico [días]
- μ_m = velocidad máxima de crecimiento [días⁻¹]. Es en función de la temperatura del lodo.
- K = parámetro inhibitorio del modelo, para excremento de ganado vacuno [adimensional]. Excesivas concentraciones en la alimentación (S₀) son inhibitorias para el proceso.
- T = temperatura del lodo

En los párrafos siguientes se discutirán estos parámetros al fin de entender las posibilidades de la producción de metano en las condiciones del altiplano.

4.3.1. Productividad del sustrato

Los sustratos típicos de un digestor rural son los residuos de las actividades agropecuarias y agrícolas: excretas animales, residuos agrícolas, rastrojos vegetales, paja, heno, hierba, algas y otras plantas acuáticas, granos y semillas averiadas, residuos de mataderos, residuos de actividades productivas y transformativas, residuos orgánicos domésticos. Puede usarse la AD también para tratar las aguas residuales. La composición química del sustrato influencia las características de la AD [Tabla 4-4].



Compounds	Sources	Examples	Anaerobic Biodegradability	Disturbing effects	Inhibitory effects
Carbohydrates Sugars Starch Cellulose	beets, corn potatoes, maize, etc. straw, grass, wood	sugar beet processing chips & starch processing farmyard manure, harvest remains	excellent excellent poor - good	foaming lignine incrustation	pH decrease ²⁾
Proteins	animals & animal products	milk processing, pharmaceutical industry	excellent	foaming	pH decrease ²⁾ , ammonia increase ³⁾
Fats	animals & animal products	slaughterhouses, rendering plants	excellent ¹⁾	scum layers, poor water solubility	VFA increase ³⁾ , pH decrease ²⁾
Volatile Fatty Acids (VFA)	fats, grease, oils, evaporation condensates	rendering plants, oil mills	excellent ¹⁾	poor water solubility of fats and oils	specific inhibition of diff. bacteria groups
Trace organic compounds	pesticides, antibiotics, detergents	pharmaceutical industry, manure	poor	foaming	antibiotic reactions
Inorganic material	salts, food additives, silica gel (filtration)	slaughterhouses, manure, food & pharm. industry	no	precipitation ⁴⁾ , sludge formation	
Sand, Grit	stable walls & floors	manure	no	precipitation, tube blocking	
Metals	packaging material, process remains	OFMSW, industry	no	blocking, precipitation	
Plastic	packaging material	OFMSW, industry	no	flotation	
Heavy metals	metal refining, batteries	OFMSW, industry	no		toxic reactions

¹⁾ necessity for high retention times; ²⁾ depending on buffer capacity; ³⁾ inhibition depending on pH value; ⁴⁾ can have positive effect through elimination of sulfide

Tabla 4-4 Influencia de diferentes compuestos sobre la digestión anaeróbica [72].

Los digestores realizados en Yanaoca utilizan excrementos vacunos como sustrato principal, pudiendo recibir también excrementos de otros animales y excretas humanas (en un caso se ha instalado una letrina conectada al digestor). Por excretas se entiende el conjunto de las heces y de la orina producidas por el animal. En la mayoría de los casos los establos de las zonas andinas carecen de sistema para recolectar la orina, infiltrándose en el subsuelo. La orina influye mínimamente sobre la cantidad de biogás producida, por su



bajo contenido en materia orgánica. Puede pero ser útil como fuente de nitrógeno, y otros microelementos catalizadores de la AD. Recolectar la orina además permite ahorrar parte del agua necesaria a la dilución de los excrementos.

Biogas Production

Sorted by Biogas/kg animal

<u>Animal</u>											
Type	Duck	Broiler	Layer	Pig	Turkey	Horse	Sheep	Beef	Dairy	Veal	
Weight per animal	3	2	2	70	8	400	60	500	500	40	kg
<u>Manure</u>											
Total	0.33	0.19	0.13	5.88	0.38	20.40	2.40	29.00	43.00	2.48	kg (per day)
TS	0.09	0.05	0.03	0.77	0.10	6.00	0.66	4.25	6.00	0.21	kg (per day)
VS	0.06	0.04	0.02	0.60	0.07	4.00	0.55	3.60	5.00	0.09	kg (per day)
Total Manure /kg animal	0.110	0.085	0.064	0.084	0.047	0.051	0.040	0.058	0.086	0.062	kg/kg animal (per day)
<u>Output</u>											
T.Biogas	0.0267	0.0167	0.0110	0.3338	0.0330	1.62	0.1975	1.56	1.24	0.0230	m ³ per day
T.Power	0.0072	0.0045	0.0030	0.0904	0.0089	0.44	0.0535	0.42	0.34	0.0062	kW
Biogas/kg manure	81.04	89.43	86.09	56.77	87.86	79.44	82.28	53.91	28.91	9.29	l/kg manure (per day)
Power/kg manure	21.95	24.22	23.32	15.38	23.80	21.51	22.28	14.60	7.83	2.52	W/kg manure (per day)
Biogas/kg animal	8.91	7.60	5.51	4.77	4.13	4.05	3.29	3.13	2.49	0.58	l/kg animal (per day)
Power/kg animal	2.41	2.06	1.49	1.29	1.12	1.10	0.89	0.85	0.67	0.16	W/kg animal (per day)

Ilustración 4-9 Productividad de varios residuos animales, útil para una primera estimación de la producción de biogás de un digestor [73].

Cada sustrato usado en la AD tiene una parte líquida y una sólida. La cantidad de sólidos presente es determinada secando el sustrato a una temperatura de 103-105° C: el residuo representa la cantidad de sólidos totales (TS). Quemando ulteriormente este residuo a una temperatura de 550 ± 50° C se puede determinar la cantidad de sólidos volátiles (VS) y sólidos fijos (cenizas) [12]. Una alternativa para medir el % TS en el campo es a través de un hidrómetro, como se describe en [74]. Se inserta el hidrómetro en el lodo, homogeneizado con agua, y se convierte la gravedad específica en % TS mediante una tabla empírica [Ilustración 4-10].



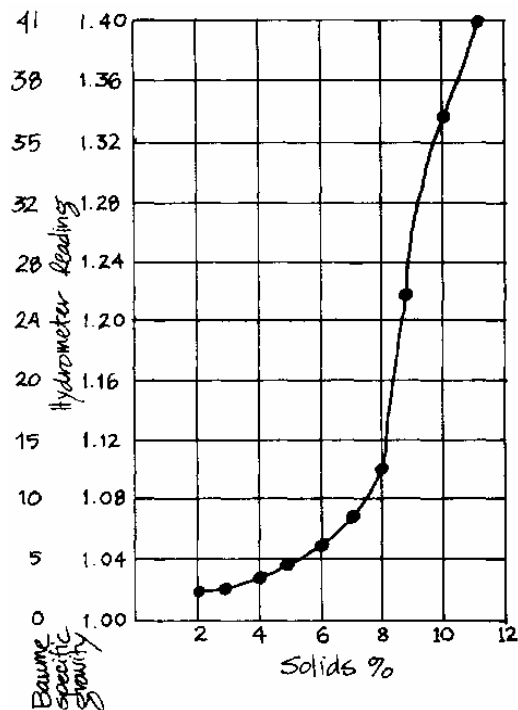


Ilustración 4-10 Relación empírica entre gravedad específica (Baume) medida mediante un hidrómetro, y el %TS en la mezcla [74].

La cantidad de VS es generalmente usada como indicación de la cantidad de materia orgánica en el sustrato, por lo tanto de la parte del sustrato que en principio puede convertirse en biogás. Los TS comprenden también los inertes (cenizas) y entonces la cantidad de TS, respecto a los VS, puede servir como indicación de la tendencia del sustrato a crear sedimentos no biodegradables al interior del digestor. Otros parámetros (COD, BOD) se usan para describir la carga orgánica del sustrato, sobretodo en el tratamiento de aguas residuales donde es importante controlar la calidad del efluente, pero no serán utilizados en este trabajo. Una relación empírica [75] reporta: $1 \text{ g VS} = 1.2 \text{ g COD} \pm 0.1$.

La composición y la cantidad de los excrementos dependen de la especie animal, de su raza, de su edad, del tipo y la cantidad de la alimentación, de la eficiencia con la cual el animal utiliza los alimentos para el crecimiento y la producción (leche, huevos...), del tipo de cría, de la recolección de los excrementos [76][77]. En las excretas se encuentran los alimentos y los metabolitos que no han sido absorbidos, y microorganismos digestivos vivos y muertos. Salo (1965, citado en [78]) reporta que hasta la tercera parte de la heces bovinas está compuesta por células bacterianas. Los componentes principales son: carbohidratos, lignina, proteínas, lípidos [Tabla 4-5].



	%VS (g/g TS)	VFA	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos (incluye celulosa y emicelulosa)	Lignina	B ₀ (lCH ₄ /kg VS)	Biodegradabilidad % (B ₀ /B _u)
Vaca lechera	89.5 %	36	150	69	625	120	148	32%
Porcino	84.8 %	72	228	137	512	49	275	69%
Paja de trigo	95.9 %	0	38.4	24	859	78	195	45%

Tabla 4-5 Composición, en g/kg VS, de los excrementos vacunos, porcinos y de la paja de trigo. Según Mollner (2004, [77]).

A partir de la composición química exacta se puede determinar la cantidad teórica de metano que el sustrato puede producir (B_u), mediante la fórmula de Buswell [77]. Lípidos y proteínas presentan una producción potencial de metano mayor que los carbohidratos (respectivamente: 1014 l/kg, 496 l/kg, 415 l/kg [77]). El potencial bioquímico B_0 (llamado también rendimiento último) es pero diferente: no toda la materia orgánica es efectivamente biodegradable por las bacterias (en particular la lignina y la celulosa en forma cristalina). Es posible determinar el potencial bioquímico del sustrato en laboratorio, conduciendo la AD en condiciones óptimas de temperatura, sin efectos inhibitorios y con un largo tiempo de retención (hasta que se anule la producción de metano). El procedimiento de laboratorio es descrito en [79].

En la práctica la conversión a metano del sustrato es todavía inferior a B_0 , por una serie de razones [79]:

- En los digestores sin retención de la biomasa, como el PTD, una fracción del sustrato es utilizada para sintetizar nueva biomasa bacteriana, típicamente el 5-10% del sustrato degradado.
- Operando con un tiempo de retención limitado, por razones económicas de la instalación, una parte del sustrato se pierde en el efluente, típicamente el 10%. A bajas temperaturas el efecto puede ser mayor. Según Wellinger (1985, citado en [80]), a temperaturas psicrófilas el rendimiento último del estiércol vacuno es del 30% inferior respecto a temperaturas mesófilas.
- Una parte del sustrato no es inmediatamente accesible a los microorganismos, ya que es presente en partículas o aglomerados con reducida superficie específica para el ataque microbiano.
- Limitación de alguna sustancia nutritiva.



Con sustratos extremadamente líquidos y solubles, se pueden obtener valores de conversión de hasta el 90% de B_u ; en el caso de sustratos con partículas y compuestos no degradables, como el caso de los excrementos vacunos, la conversión baja a 30 – 60 % [79].

4.3.2. Tasa de alimentación del digestor

Uno de los primeros pasos en el diseño de un digestor rural es verificar la cantidad de residuos disponibles para la alimentación. Estos deben ser constantes durante el año y fácilmente recolectables y transportables al digestor. Conociendo la cantidad disponible, es posible avanzar hipótesis sobre la cantidad de metano producible, consultando los valores de rendimientos que se pueden encontrar en la literatura [8][14][26], o conduciendo un análisis de laboratorio. En el caso la producción de metano sea en exceso con su posibilidad de utilizzo, se destina entonces una parte del sustrato a otras prácticas de bioconversión (compost, combustión directa...).

Una vez determinada la cantidad disponible diariamente, hace falta escoger el tiempo de retención hidráulica (HRT). Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos (batch) donde el HRT coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El PTD es un digestor que carece de sistemas de retención de la biomasa bacteriana, entonces el HRT es igual al tiempo de retención celular (C). De hecho es C, más que el HRT, es el parámetro de tiempo que determina el funcionamiento de cualquier digestor ([24], p.87).

Las bacterias metanogénicas tienen un tiempo de generación (tiempo en el cual se duplica el número de bacterias) relativamente largo respecto a otras bacterias implicadas en la AD ([24], p. 88). Si la velocidad con la cual se pierden las bacterias en el efluente es mayor de la velocidad con la cual se reproducen en el digestor, habrá un lavado (“washout”) de la población bacteriana, causando inestabilidad en el proceso. El washout es evitado manteniendo un HRT por encima del tiempo de doblamiento microbiano [80]. Generalmente los digestores rurales se operan con un HRT bastante por encima de este mínimo.

La decisión final sobre el valor de HRT se hace sobre bases económicas. Aumentando el HRT aumenta el volumen de la planta y entonces su coste. También el espacio necesario para una planta de mayor dimensión es un factor limitante, sobre todo para el PTD, que con su disposición horizontal tiene un gran impacto sobre la topografía del gremio campesino. Por otro lado un mayor valor de HRT permite aumentar la conversión del sustrato a metano ($m^3 CH_4/kg$ VS alimentados), pero a la vez disminuye la productividad del



digestor por unidad de volumen ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^3 \text{ digestor}/\text{día}$). En la [Tabla 4-6] se ve como la producción incremental de biogás se va reduciendo al aumentar del HRT, por ende puede ser inconveniente fijar un HRT demasiado elevado. El andamio de las curvas depende del tipo de sustrato y entonces no puede ser generalizado. Sutter y Wellinger (1988, citado en [53]) reportan en su estudio que la producción de biogás en un digestor operante a 20°C y a 40 – 50 días de HRT es comparable con un digestor operante a temperaturas mesofílicas pero a mitad HRT.

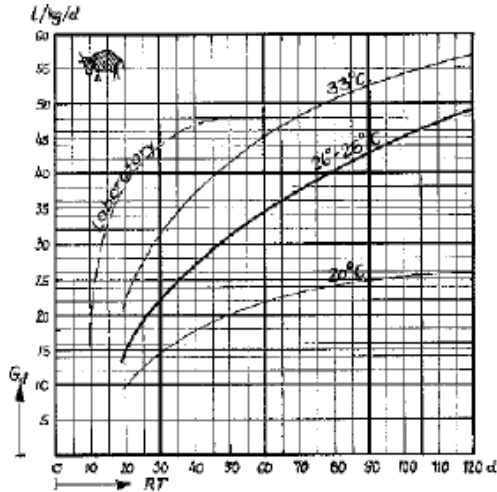


Tabla 4-6 Variación de la producción de biogás (l/kg excrementos) al variar del tiempo de retención y de la temperatura [26]. Datos empíricos con excremento vacuno.

Relacionado a HRT es la concentración en sólidos de la alimentación. La mayoría de los digestores rurales se alimenta con %TS en el sustrato entre 5 y 10%. Los digestores plug flow se alimentan con %TS hasta el 11 -13% ya que la concentración va disminuyendo a lo largo del reactor. Porcentajes mayores del 15% tienden a inhibir el metabolismo de los microorganismos [14], a causa de la reducida movilidad en el fluido de los nutrientes, de los microorganismos y de sus metabolitos [8]. La cantidad de agua en la mezcla es importante por tres razones:

- Es necesaria al metabolismo de los microorganismos;
- Aumenta la dilución de las sustancias tóxicas e inhibitorias, evitando que se alcancen concentraciones límites;
- La difusión de los nutrientes, de los metabolitos y de los microorganismos en la mezcla ocurre en la fase líquida.

Solo una parte del carbono orgánico se encuentra disuelta en agua (14% para vacunos, 21% cerdos, 29% gallináceos, según [78]), lo restante se encuentra en macromoléculas en



suspensión. La parte disuelta se convierte rápidamente en biogás durante los primeros días de AD, mientras la materia en suspensión necesita ser hidrolizada. La hidrólisis de las partículas suspendidas es frecuentemente la etapa controlante de la AD [81], y a bajas temperaturas (<15 °C) la velocidad de hidrólisis puede anularse para algunos tipos de sólidos [20]. La velocidad de hidrólisis según la clase de sustrato aumenta en el orden siguiente [80]: celulosa, hemicelulosa, proteínas, lípidos, carbohidratos (almidón y azúcares sencillos).

La hidrólisis generalmente se describe por una cinética de primer orden [82], del tipo:

$$r_s = k_s \cdot S$$

Donde r_s es la velocidad de degradación del sustrato, k_s es la constante cinética [día^{-1}] y S la concentración del sustrato. La celulosa es uno de los compuestos más abundante en los excrementos vacunos, hasta el 25% de materia seca [72], y su velocidad de degradación depende fuertemente de la temperatura [Tabla 4-7].

Temperature (°C)	Solids retention time (days)				
	5	10	15	30	60
35	1.95	1.21	0.62	0.38	0.21
25	0.29	0.27	0.27	0.34	0.16
20	0.09	0.14	0.13	0.14	0.10
15	–	0.05	0.03	0.10	0.08

Tabla 4-7 Valores de k_s (días^{-1}) para la hidrólisis de la celulosa en función de T y HRT (O'Rourke, 1968, citado en [82])

HRT y % VS se combinan para dar la tasa de alimentación de materia orgánica (OLR), medida en (Kg VS alimentados / día) / m^3 lodo. En la literatura a menudo se usa este parámetro para describir la operación del digestor. Generalmente al aumentar de OLR aumenta la productividad volumétrica del digestor ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^3 \text{lodo/día}$), mientras disminuye la conversión del sustrato ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS alimentados}$) [21].

4.3.3. Dimensionamiento del digestor

Los argumentos expuestos en los precedentes párrafos son a la base del dimensionamiento de los reactores. En la practica pero es difícil poder medir experimentalmente los valores necesarios a optimizar la producción de gas. Más a menudo se utilizan datos de literatura o si posible basándose sobre el funcionamiento de algún digestor que esté ya operando en la zona. En el caso de esta investigación, los datos a disposición para guiar el dimensionamiento eran extremadamente escasos:



- No se conocía la temperatura que el PTD habría alcanzado instalándolo bajo el invernadero.
- No hubo la posibilidad de medir el %TS, y menos aún el %VS del residuo.
- Se midió la cantidad de residuo disponible diariamente, pero en ambos casos los beneficiarios avisaron sobre la posibilidad que la cantidad habría podido aumentar en el futuro, por la compra de nuevos animales.

Con estas limitaciones, el dimensionamiento fue esencialmente guiado por el buen sentido:

- El tiempo de retención fue fijado por ambos los digestores en 80 días, para evitar el wash-out también en el caso de bajas temperaturas y de aumentos en la alimentación diaria.
- Se dieron instrucciones a los usuarios para que la alimentación se preparara mediante dilución de una parte de excremento vacuno con una parte de agua, que es un valor difundido en la literatura de los digestores rurales [8][14][26][73]. Posiblemente la concentración resultante oscile entre 10 – 13 %TS.

4.3.4. Start up del digestor

Lo start up del digestor es una fase delicada. Su función es la de crear al interior del digestor una población microbiana capaz de conducir la metanogénesis del residuo que posteriormente se alimentará. Bacterias metanogénicas pueden encontrarse en el efluente de digestores, en las plantas de tratamiento de líquidos cloacales, en los excrementos y en el rumen de rumiantes, y en la biomasa en descomposición que se encuentra en ambientes anóxicos (lagunas, estiercoleras, arrozales). En la digestión de estiércol fresco a temperaturas inferiores a 15° C, la producción de metano puede tardar hasta 5 meses para empezar. La producción de metano a bajas temperaturas es posible cuando altos porcentajes de inóculo son introducidos en el digestor (50% vol.) (Zeeman, 1991). Cuando el residuo ha sido almacenado por un cierto periodo de tiempo antes de la alimentación se puede decir que ha sufrido una especie de pre-start up, y entonces el arranque del digestor puede ser más rápido.

El inóculo utilizado en la investigación se realizó mezclando en agua estiércol vacuno, rumen vacuno y ovino, sedimentos procedente de lagunas cercanas a la zona de instalación. Se preparó una cantidad suficiente para llenar los respectivos digestores; la concentración en sólidos no es vinculante, siendo posible preparar un inóculo más diluido de la carga de diseño. La concentración de la carga inicial para los dos digestores fue posiblemente entre 6 – 8 % TS. En ambos casos la producción de biogás empezó a partir



del segundo-tercer día, y la producción se ventiló al aire. Se esperó hasta dos semanas antes de alimentar diariamente los digestores porque hubiera un mínimo de adaptación de las bacterias al nuevo ambiente y temperatura. En realidad el proceso de adaptación es mucho más largo y necesitaría de otras estrategias, como se discute a continuación.

Singh *et al.* [83] adaptó a la temperatura de 10° C un inóculo proveniente de digestores mesofílicos, después de cinco pasos (cuatro meses cada uno) a temperaturas decrecientes. El inóculo mejor resultó ser aquel proveniente de la codigestión mesofílica de excremento vacuno y residuos vegetales (*Agaratum* y *Lantana*). Con este inóculo condujo la AD de aguas negras (dilución con agua 1:1), a 10° C, con HRT entre 20 y 40 días. La producción máxima de biogás durante doce semanas se obtuvo a 25 días de HRT, con valores productividad volumétrica de 0.24 l CH₄/l lodo/día (con una productividad específica del sustrato de 69.72 l CH₄/kg VS alimentado/día). Interesantemente el estudio condujo también un análisis de la población enzimática presente en el digestor alimentado a 25 días de HRT. Se encontró que la actividad de los diferentes enzimas hidrolíticos todavía presentaba una fuerte correlación con el aumento de temperatura, con aumentos en la actividad de las diferentes enzimas hidrolíticas entre 3 y 4 veces pasando de 10° C a 30° C. Esto demuestra como el consorcio microbiano, durante la adaptación, desarrolló la capacidad de metanogénesis a bajas temperatura, mientras aumentó mucho menos la capacidad de producir enzimas activos a bajas temperaturas.

Kettunen y Rintala [84] confrontaron la actividad metanogénica de dos diferentes inóculos en el tratamiento de lixiviados municipales (2.5 g COD/l): el primer inóculo era lodo de un digestor operante a 37° C, el segundo biomasa proveniente de un UASB con cuatro meses de actividad a temperaturas inferiores (24° C), que a su vez había estado inoculado con el lodo del primer digestor. La adaptación del inóculo afectó grandemente la actividad metanogénica (ml CH₄/(g VS · h)) a bajas temperaturas: a 11° C la actividad metanogénica de la biomasa adaptada fue siete veces superior a la biomasa no adaptada, y a 22° C la relación fue de cinco veces. Con la biomasa adaptada, a ambas temperaturas, se alcanzaron niveles de actividad que con biomasa no adaptada se alcanzan a temperaturas de 10° C superiores. El mismo estudio reporta que las ecuaciones cinéticas generalmente usadas (de tipo Arrhenius) son deficitarias a la hora de prever la actividad metanogénica a baja temperatura de la biomasa adaptada. Consecuentemente la eficiencia de un proceso a baja temperatura puede ser subestimada cuando se usen valores cinéticos obtenidos a través de experimentos con biomasa no adaptada (como los valores de [Ilustración 4-1] y [Ilustración 4-2]).

Digestores con retención de biomasa aumentan la eficiencia en la producción de biogás al aumentar del periodo de operación. Rebac et al. (1995, citado en [84]) reporta un aumento de tres veces en la velocidad de degradación del acetato, después de 253 días de



operación de un reactor EGSB (expanded granular sludge bed) a la temperatura media de 10° C. Yan y Tay (1996, citado en [84]) reporta un aumento de diez veces en la actividad metanogénica en un reactor UASB, después de 300 días de operación de tratamiento de aguas residuales de destilería a 18° C. Tales aumentos pueden justificarse gracias al aumento en número de la población microbiana retenida en el digestor, y a una selección de los metanógenos con más actividad en las condiciones dadas.

Los estudios citados precedentemente reportan el comportamiento de microorganismos tolerantes la baja temperatura, es decir psicrótróficos. Este tipo de microorganismos sigue presentando un aumento de la actividad al aumentar de la temperatura, denunciando su diferencia respecto a microorganismos realmente psicrófilicos, que al contrario son inhibidos a altas temperaturas [Ilustración 2-3]. En los últimos años ha aumentado la investigación sobre los psicrófilicos que se pueden encontrar en ecosistemas a baja temperatura: tundra, sedimentos en lagunas nórdicas, pantanos, etc. [53]. Todavía no existen estudios que documenten el uso de estos microorganismos en aplicaciones prácticas de AD, sobre todo a causa de su difícil aislamiento, ya que en la mayoría de los casos conviven con microorganismos mesófilicos y termófilicos [85]. No hay evidencias que la práctica de utilizar sedimentos lagunares en el inóculo pueda mejorar conversión y productividad del digestor. En Bohm *et al.* [81] la digestión a 10° C de hojas de remolacha usando sedimento lacustre como inóculo, dio conversiones comparables a la de un reactor operado a 20° C inoculado con efluente de un digestor no calentado, pero a una velocidad inferior.

Existen diferencias en las rutas metabólicas entre AD a temperaturas psicrófilicas (< 20° C) y a temperaturas mesófilicas. A bajas temperaturas la formación de acetato (a través de homoacetogénesis) y la metanogénesis acetoclástica representa la ruta principal para la generación de metano: confróntese [Ilustración 2-2] con [Ilustración 4-11]. En el rumen bovino el acetato es absorbido rápidamente por la sangre, y la producción de CH₄ ocurre principalmente vía H₂ [12], situación diferente respecto a la que ocurre a baja temperatura. Esta puede ser una razón para utilizar sedimentos de laguna para inocular el digestor.



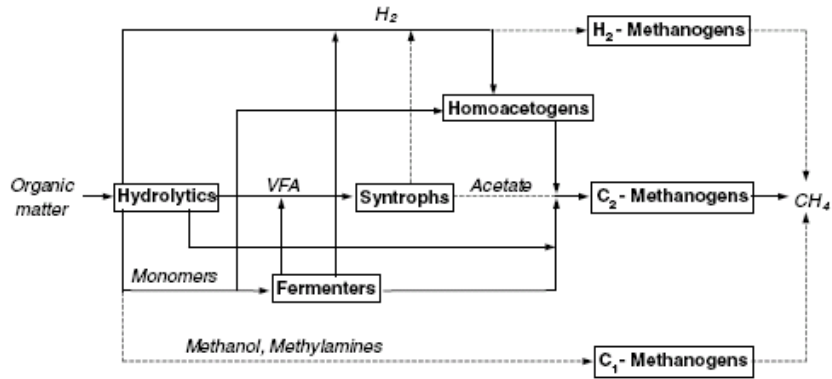


Ilustración 4-11 Esquema de las interacciones tróficas que se desarrollan en un consorcio microbiano a bajas temperaturas. Líneas continuas: rutas principales. Líneas punteadas: rutas reducidas [86].



5. Uso del biogás

El biogás es un gas combustible, y como tal puede ser utilizado en diferentes maneras: en quemadores como estufas, lámparas de gas, refrigeradores, máquinas de combustión interna [34]. Durante la investigación se realizaron dos quemadores de cocina y sobre esta aplicación se concentra esta memoria.

En la evaluación de una cualquier estufa doméstica rural, el parámetro más importante y más estudiado es su eficiencia energética; recientemente el acento ha sido puesto también sobre otros factores como la emisión de sustancias nocivas para la salud y de gases de efecto invernadero [87].

El quemador representa el último mecanismo de conversión de energética en el sistema de la AD realizado. Todos los esfuerzos para mejorar la eficiencia del digestor pueden resultar vanos cuando el quemador funcione ineficientemente. La eficiencia global (OE) del quemador puede dividirse en eficiencia nominal de la combustión (NCE) y eficiencia de la transferencia de calor (HTE):

$$OE = NCE \cdot HTE$$

La OE es el porcentaje de calor que se transfiere a la cazuela y a su contenido, respecto a la energía química contenida en el combustible consumado durante la cocción. La NCE es indicada como el porcentaje de carbono contenido en el combustible que se convierte en CO₂ en la combustión. La parte de carbono que no se convierte a CO₂ es indicada como producto incompleto de combustión (PIC), y depende del diseño del quemador y de las características fisicoquímicas del combustible. (PIC=1-NCE) representa una indicación del calor desaprovechado en la combustión. En los PIC también son contenidos las sustancias nocivas a la salud y los gases de efecto invernadero. La HTE representa el porcentaje de calor liberado por la combustión que efectivamente se transfiere a la cazuela y a su contenido. Esta depende de las condiciones ambientales (temperatura, viento, humedad, presión) y del diseño de la estufa.



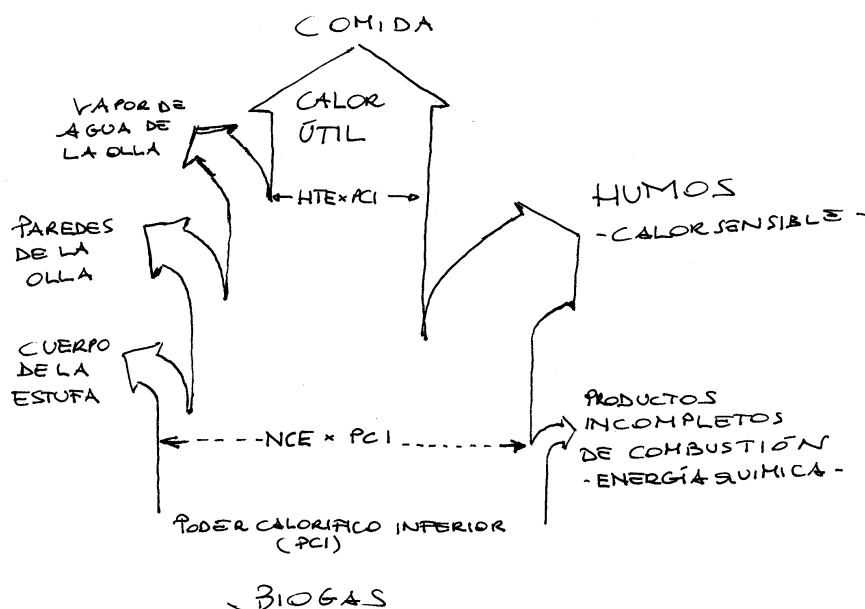


Ilustración 5-1 Pérdidas de calor y eficiencias en una estufa a biogás.

5.1. Características de la combustión del biogás

Relación estequiométrica de combustión. La cantidad estequiométrica es de 1 mol de CH_4 por 2 mol de O_2 , es decir 1 volumen de biogás (60% CH_4 , 40% CO_2) en 5.7 volúmenes de aire (21% O_2). En práctica es necesaria una cantidad de aire superior a la estequiométrica (mezcla pobre) para una combustión completa. Cuando la cantidad de aire sea inferior a la estequiométrica aumentan las cantidades de CO, incombustos y carbono (hollín). Cuando se trabaje con cantidades superiores de aire la temperatura de llama disminuye y disminuye la HTE. El aire primario que entra al quemador raramente es suficiente para alcanzar la relación estequiométrica [88], de aquí la necesidad de permitir el ingreso de aire secundario a la zona de combustión.

Productos de combustión. En una combustión completa del biogás con aire los productos teóricos son CO_2 y H_2O y N_2 . Las pequeñas cantidades de H_2S (1-3%) presentes en el biogás se oxidan a SO_2 y SO_3 . SO_3 se combina con el vapor de agua para dar ácido sulfúrico H_2SO_4 , que puede corroer materiales en hierro, aluminio, zinc. La durabilidad del quemador puede resultar afectada a causa de la corrosión. Una solución es utilizar quemadores en arcilla o cerámica. La otra es la desulfurización del biogás. Una óptima reseña de métodos para purificar el biogás del H_2S antes de su uso, puede encontrarse en [89], que también trata de filtros biológicos a base de compost. Generalmente el contenido de H_2S en el biogás obtenido de residuos animales es inferior al 1% vol., y la



desulfurización en estos casos no es necesaria [14]. Residuos ricos en proteínas (p. ej. melazas) o en sulfatos producen cantidades problemáticas de H_2S (>3% vol.).

Temperatura de llama. El calor liberado por la reacción entre combustible y O_2 , calienta los productos de reacción, y por radiación y convección el calor se transfiere a los alrededores: la temperatura resultante en la zona de reacción es llamada temperatura de llama (adiabática cuando no haya transferencia de calor a los alrededores). La temperatura de llama máxima se consigue con relaciones estequiométricas y en la zona de reacción primaria (donde ocurre la reacción del biogás con el aire primario) [Ilustración 5-3]. La temperatura de llama adiabática para el biogás es entre 1700° - 1900° C [90], mientras la temperatura que se alcanza en el uso real oscila entre 600° - 800° C [29][91]. Es posible utilizar el valor de la temperatura de llama para evaluar el % CH_4 del biogás, como se explica en [91].

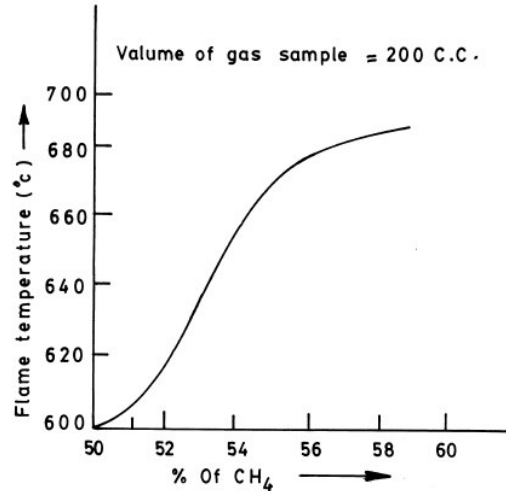


Ilustración 5-2 Variación de la temperatura de llama del biogás en relación al % CH_4 [91]

La estufa debería diseñarse en manera tal que la base tocara esta zona de temperatura máxima. Si la olla es demasiado cerca de las llamas, estas son enfriadas y la combustión será menos eficiente. Si se pone demasiado lejos una mayor parte de calor se pierde con los humos con una transferencia de calor menos eficiente.



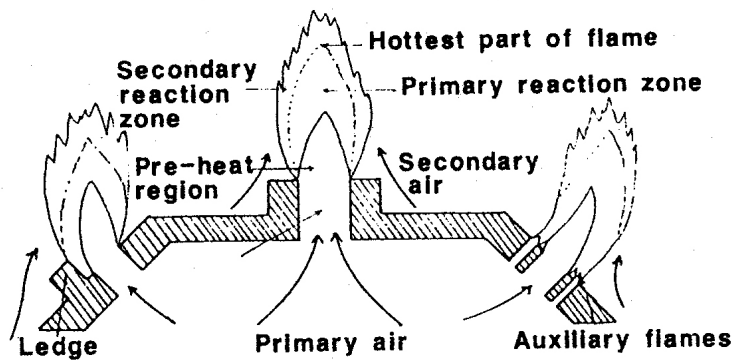


Ilustración 5-3 Detalles de la llama y medios de estabilización [88].

Velocidad de llama. Es la velocidad, relativa a la mezcla incombusta, a la cual una llama avanza en la mezcla de gases. La velocidad de llama es fuertemente dependiente de la relación combustible/aire, pasando de cerca de cero al límite de mezcla pobre, a través de un valor máximo y otra vez cerca de cero para el límite de mezcla rica [92]. Es un valor importante en el diseño de los quemadores para evitar los fenómenos de “flash back” y “blow off” de la llama [Ilustración 5-4]. Werner [8] reporta los siguientes valores de velocidad de llama: para el CH₄ 43 cm/s, para el biogás (60% CH₄) 36 cm/s. Fulford [88] reporta valores inferiores y aconseja que la velocidad de salida de la mezcla, en cada orificio, sea inferior a 25 cm/s.

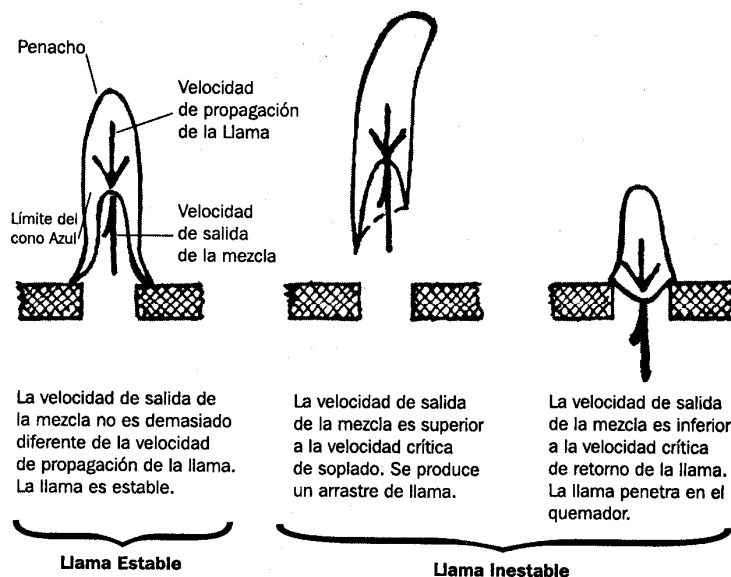


Ilustración 5-4 Formas de la llama en relación a la velocidad de llama [93].

Límites de flamabilidad. Para el metano los límites de flamabilidad en aire (vol. combustible: vol. aire) son entre el 5 y 15% vol. En el caso del biogás los límites varían de acuerdo al



contenido de CO_2 y H_2O [Ilustración 5-5 Límites de flamabilidad (explosión) para el biogás en función de su contenido en metano y vapor de agua [90]]. Tales límites son importantes a la hora de evaluar la seguridad de la instalación en caso de ambientes con escasa ventilación.

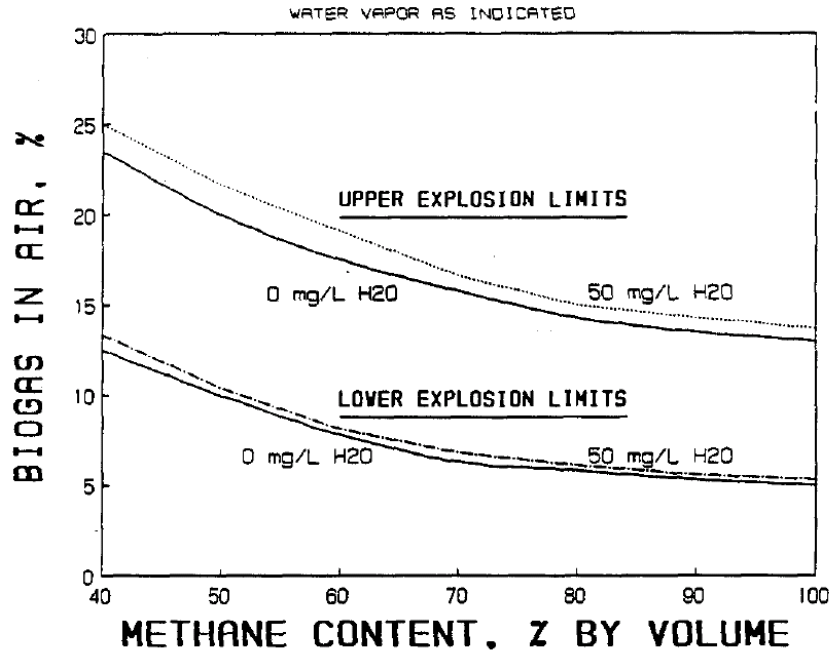


Ilustración 5-5 Límites de flamabilidad (explosión) para el biogás en función de su contenido en metano y vapor de agua [90].

5.2. Dimensionamiento de un quemador de biogás

El uso del biogás tiene dos importantes diferencias respecto a otros combustibles gaseosos:

- El biogás tiene un menor poder calorífico por unidad de volumen respecto a otros combustibles gaseosos. El número de Wobbe (W_o) ([90], p. 71) se utiliza para confrontar diferentes combustibles: un quemador diseñado para suministrar una cierta cantidad de calor podrá funcionar igualmente con dos combustibles diferentes solo si los combustibles tienen un mismo número de Wobbe. El biogás ($W_o=22.2$) es menos efectivo que el gas natural ($W_o=50.7$) y el GPL ($W_o=80$) ([88], p. 137). Si la presión de suministro fuera la misma, sería posible adaptar a biogás un quemador diseñado para gas natural o GPL aumentando el área (sección) del inyector. La relación entre los números de W_o dona el aumento de área necesario.



- Los digestores tubulares plásticos alcanzan presiones de trabajo muy bajas, en el orden de los 3 - 6 cm H₂O. Incluso utilizando tanques suplementares de almacenamiento, la presión de alimentación del biogás al quemador difícilmente superaría los 10 cm H₂O. Estos valores son ampliamente inferiores a los valores de alimentación de los quemadores diseñados por el gas natural y menos aún en el caso del GPL.
- Otras diferencias son la menor velocidad de llama y la menor cantidad de aire estequiométrica que necesita el biogás.

Por estos motivos se ha decidido proceder a la realización de dos quemadores apropiados para las dos instalaciones, sin intentar la adaptación de quemadores domésticos. La realización de una estufa eficiente es más un trabajo de ensayo y error, ya que son muchas las variables que influyen su funcionamiento, pero es posible apoyarse a unos modelos para determinar la zona de trabajo.

	CH ₄ , 1 atm, 0° C	60% CH ₄ 40% CO ₂ , 1 atm, 0° C	60% CH ₄ 40% CO ₂ , 0.61 atm, 0° C
Poder calorífico inferior	36 MJ/m ³ – 50 MJ/kg	21.6 MJ/m ³ – 17.8 MJ/kg	13.2 MJ/m ³ – 17.8 MJ/kg
Densidad	0.71 g/l	1.21 g/l	0.74 g/l
Gravedad específica (gas/aire)	0.55	0.94	0.94
Relación estequiométrica	1 metano : 9.5 aire	1 biogás: 5.7 aire (vol.)	1 biogás : 5.7 aire (vol.)
Velocidad de llama	43 cm / s	25 cm / s	25 cm / s

Tabla 5-1 Valores utilizados para el dimensionamiento del quemador (compilados a partir de [8][88] .

La estufa que se ha diseñado y construido durante la investigación sigue el mecanismo del mechero Bunsen. El gas llega con una cierta velocidad y presión al quemador, dependiendo de la presión existente en el digestor, o en la bolsa de acumulación, y el diámetro y el largo de la tubería. A la entrada del quemador el gas pasa a través de un inyector que transforma parte de su presión en mayor energía cinética. Se forma un chorro de gas que va inspirando aire, por arrastre y por efecto Venturi, a través de unas aberturas en la tubería. Este aire se llama aire primario y debe ser completamente mezclado con el biogás. Por esta razón el conducto debe ser lo suficientemente largo (10 veces su diámetro). La mezcla mejora si el conducto es de tipo divergente. Al final del conducto la mezcla entra en la cabeza del quemador, al interior de la cual la presión se uniforma antes



que la mezcla salga a través de los orificios a una velocidad similar a la velocidad de llama del biogás. Sobre la cabeza la mezcla de gas-aire primario se combina con el aire secundario completando la combustión de los gases.

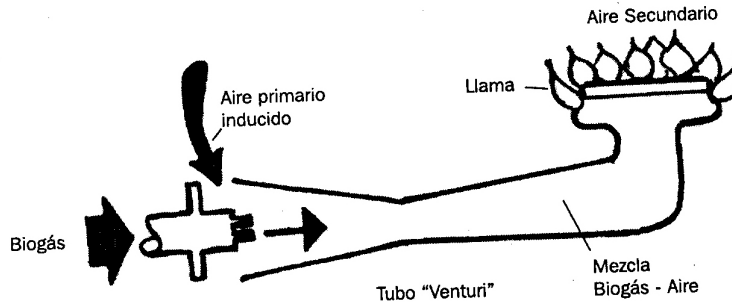


Ilustración 5-6 Componentes de un quemador a gas [93].

Los quemadores de biogás pueden ser dimensionados conociendo la potencia necesitada en la cocción. Para instalaciones domésticas un flujo de 200-400 l/h (a 1 atm) de biogás parece ser suficiente analizando los datos de literatura [8]. Es obvio que los valores dependen del tipo de alimentos que se van a cocinar y de la eficiencia de la estufa. Algunos tipos de cocción necesitan de altas potencias (carne), mientras una menor potencia es necesaria cuando el objetivo es mantener la cocción por largo tiempo a la temperatura de ebullición (legumbres, pasta, arroz). En este trabajo se ha escogido un valor de 300 l/h, que corresponde a 0.363 kg/h con una potencia teórica de 6.46 MJ/h (1.79 kW).

La presión a la cual llega el biogás y el diámetro del inyector determinan el flujo real de biogás. La presión del gas puede medirse con un manómetro a U y puede considerarse igual a la presión existente en la bolsa de almacenamiento, cuando la tubería tenga un diámetro adecuado que reduzca las pérdidas por fricción (diámetros entre 1/2" y 1" son adecuados para flujos entre 0.1 y 2 m³/h). El diámetro del inyector va a ser el parámetro de diseño que hay que controlar. Un inyector sencillo puede realizarse mediante un orificio en una pared fina.



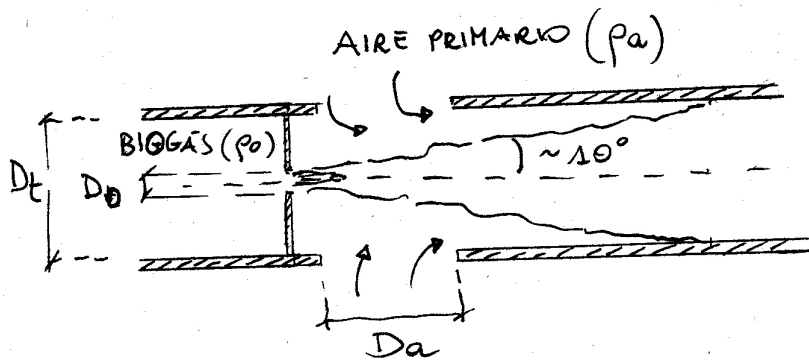


Ilustración 5-7 Esquema del orificio usado como inyector.

En este caso los flujos volumétricos (m^3/s) y en masa (kg/s) de gas que pasa a través del orificio son dados aproximadamente por ([88] p. 135):

$$\dot{V} = A_0 \cdot C \cdot \sqrt{2p_0 / \rho_0} \quad (\text{ec. 5.1})$$

$$\dot{m} = A_0 \cdot C \cdot \sqrt{2p_0 \cdot \rho_0} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Donde A_0 (m^2) es el área del orificio, C es el coeficiente de descarga del orificio, ρ_0 la densidad del biogás (kg/m^3), y p_0 (Pa) la presión (manométrica) del biogás antes del orificio. C es adimensional y puede encontrarse en tablas en función de la relación entre diámetro del tubo (D) y diámetro del orificio ([92], sección 10-15): normalmente los valores son entre 0.6 y 0.7 y en este trabajo se usa el valor de 0.62.



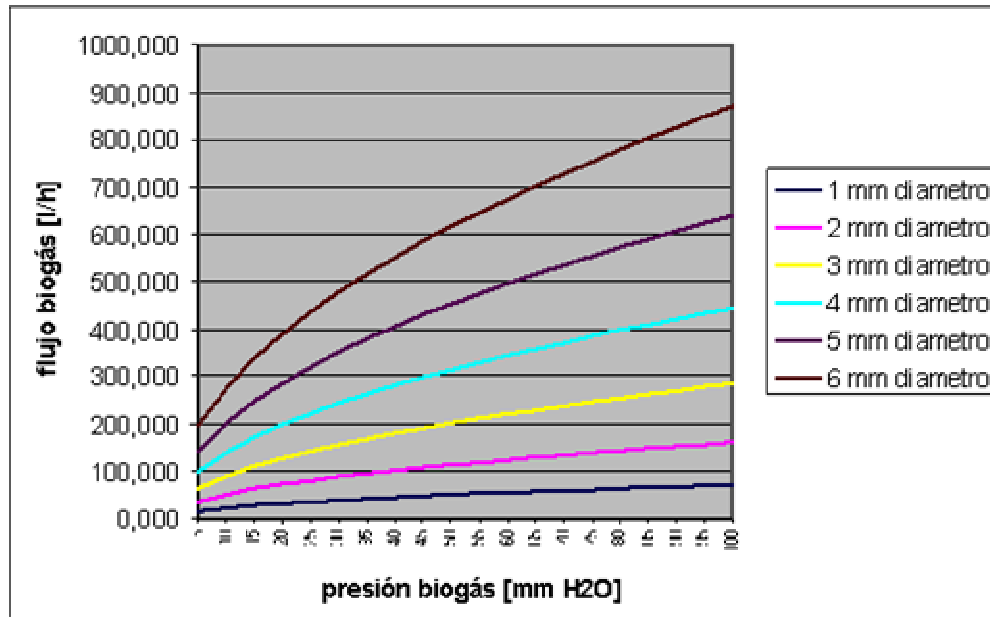


Ilustración 5-8 Flujo volumétrico en función de la presión del biogás y del diámetro del orificio (datos calculados con la ec. (1) a 1 atm y 0° C).

El chorro que sale del orificio provoca el arrastre del aire que entra por las aberturas laterales, como en un mechero Bunsen. La cantidad exacta de aire dependerá de la presión del biogás, de la velocidad del chorro, de las relaciones geométricas entre los varios elementos (chorro, tubo, aberturas laterales). Difícilmente la cantidad de aire arrastrada será suficiente para conseguir una mezcla estequiométrica. Una primera estimación se puede obtener según sigue. A partir de la conservación de la cantidad de movimiento, y considerando un chorro con ángulo de abertura de 18° ([92], sección 6-20), se deriva una ecuación que modela la masa de aire (m_a) arrastrada por el chorro (m_0) [94]:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_0} = 0.47 \cdot \left(\frac{D_t}{D_0} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{0.5} - 0.5 \quad (\text{ec. 5.3})$$

D_0 es el diámetro del orificio, D_t el diámetro del tubo, ρ_a y ρ_0 las densidades de aire y biogás respectivamente. En la construcción del quemador se aconseja $D_t/D_0 > 6$ y largo del tubo de mezcla $> 7D_t$.

El último paso es el dimensionamiento del área de llama, es decir el área total de la cabeza del quemador destinada a la salida de la mezcla aire-biogás. El valor del área debería ser tal que la velocidad lineal del flujo en cada orificio de la cabeza no sea superior a la velocidad de llama de la mezcla. La velocidad de llama del biogás varía en la literatura consultada: 25 cm/s [88]– 36 cm/s [8]. Aquí se usará el valor de 25 cm/s. A través de la ec.



3 se puede conocer la relación entre los volúmenes de aire primario y biogás. Cuando la relación sea estequiométrica la velocidad de llama será máxima (25 cm/s); en el caso común de mezcla rica la velocidad de llama será inferior. Se determina el área total de llama (A_L):

$$A_L \leq \frac{\left(\frac{\dot{m}_a}{\rho_a} + \frac{\dot{m}_0}{\rho_0} \right)}{0.25} \quad (\text{ec. 5.4})$$

La cabeza del quemador es compuesta por N orificios de área A_L/N . El diámetro de los orificios (D_L) determina N. A través de experimentos con dimensiones diferentes debería encontrarse un valor óptimo. Durante la investigación se ha experimentado con combinaciones diferentes de D_L y N, y los resultados mejores (estabilidad de llama, color azul intenso) se han obtenido con diámetros bastante grandes 6 – 8 mm. Con diámetros más pequeños algunas llamas tenían la tendencia a apagarse.

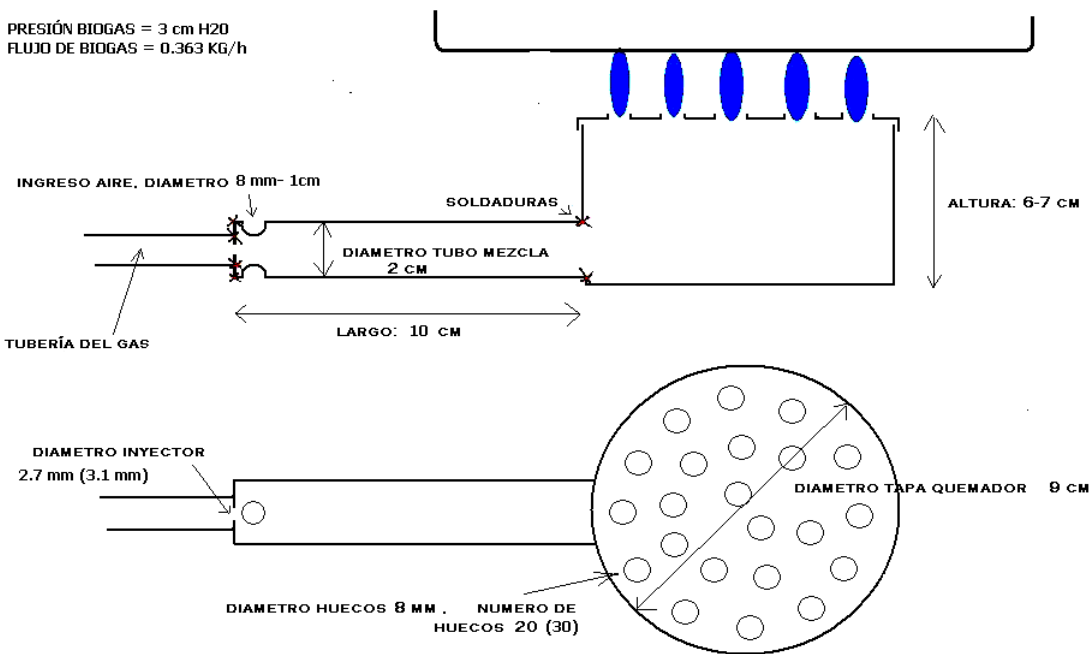


Ilustración 5-9 Dimensiones de un quemador dimensionado para uso doméstico con PTD. Los números entre paréntesis son los cambios para las zonas de gran altitud (>4000 m).





Ilustración 5-10 Foto del quemador experimental realizado a Chollocani.





6. Detalles del trabajo de campo

El trabajo de campo verdadero se extendió durante el periodo enero-abril 2006, en la microcuenca de Jabón Mayo. Aspectos relativos a la dificultad de movilidad y a la falta de personal trabajador, han causado un aumento considerable de los tiempos necesarios para la realización de las actividades.

6.1 Elección de los sitios para la instalación del PTD

La intención inicial de la investigación era de instalar dos digestores, uno al interior de un invernadero, y el otro flotando en un acuitoldo (poza artificial para la crianza de peces, calentado mediante invernadero). Digestores flotantes se han difundido en Vietnam [35], y en el caso del acuitoldo hay las ventajas de temperaturas constantes y tibias. Ambas ideas se descartaron durante la visita de la microcuenca:

- En los invernaderos existentes el espacio disponible era escaso.
- La instalación en acuitoldo apareció como complicada; la temperatura del agua insuficiente; la posibilidad de rupturas del PTD demasiado riesgosa para la vida de los peces.
- Los invernaderos se situaban lejos de cualquier estable, dificultando la carga diaria.
- La gestión de los invernaderos es a cargo de la entera comunidad, dificultando individuar algún representante que se responsabilice de la operación de los digestores.

Lo más importante fue darse cuenta que no es posible realizar provechosamente una investigación sobre digestores rurales como si fuera una experiencia de laboratorio: hay un sinnúmero de aspectos (organización social, geografía, prácticas agrícolas, etc.) que se escapan del dominio de la química y de la física y que son igualmente importantes en decretar la viabilidad de una tecnología.

Se decidió entonces visitar los predios de aquellos campesinos que ya tenían algún tipo de relación con la organización IAA, y instalar digestores de tipo familiar, que tuvieran una sola familia como beneficiario y como responsable de las operaciones. La elección de los sitios se basó sobre una serie de razones:

- Crianza de animales para tener una disponibilidad diaria de más de 15 kg de estiércol. El proverbio recuerda: “Es el residuo que produce biogás, no el digestor”.



- Espacio suficiente y cercano al establo para la instalación del digestor. La regla recita: “El digestor pertenece al establo y no a la cocina”.
- Interés para colaborar a la investigación.

Se decidió instalar dos digestores, con los respectivos invernaderos, en los predios de dos familias en dos comunidades cerca del poblado de Yanaoca.

6.2. Digestor en la comunidad de Chollocani

Se realizó en el predio de Don Valentín Ayma, situado en la comunidad campesina de Chollocani, en la parte más alta de la microcuenca, a 3-4 km del poblado de Yanaoca. La familia es compuesta por 6 miembros (padre, madre y 4 hijos). Las actividades productivas son agricultura, ganadería y producción artesanal de tejidos en lana. Se crían 2 vacas (250 kg de peso medio) y 30 cuyes. La familia también posee dos burros. La disponibilidad de agua no parece ser una limitación, y hay dos fuentes en el predio: de un reservorio de la comunidad, transportada mediante tubería, y de un manantial, a través de un canal que pasa al lado de la casa. No es presente un sistema de alcantarillado, y como letrina se usa un hoyo (letrina de hoyo seco) que se encuentra a unos 40 metros de la casa.

Consumo de energía. El combustible utilizado, antes de la instalación del digestor, para la cocción de alimentos consistía principalmente de bosta (estiércol animal secado al sol), en una cantidad aproximativa de 12 – 15 kg/día. La comunidad tiene enlace a la red eléctrica, a pesar que el usuario se lamentó de frecuentes interrupciones en el suministro. La energía eléctrica se usa principalmente para el alumbrado y una radio. Tenía un coste de 0.2397 soles/kWh, dando un gasto mensual medio de 5 soles (1.3 US \$), cerca de 20 kWh/mes.

Residuos disponibles para la AD. Se consideran solamente los residuos de los residuos de origen animal: vacas, burros, cuyes. Además se planea construir una letrina conectada directamente al digestor. Vacas y burros son estabulados solamente durante la noche. La cantidad recolectable es entonces aproximadamente la mitad de la cantidad total de excrementos producidos diariamente. El piso del establo es de tierra, entonces la orina de los animales se pierde casi por completo. A 100 metros del digestor se encuentra un gran establo que es utilizado para estabular las vacas de la comunidad, aproximadamente 50 animales. Se ha aprovechado de la abundancia de residuos que allí se acumulan para preparar la primera carga, pero el dimensionamiento del digestor se ha efectuado únicamente sobre la base de las cantidades que se pueden recolectar diariamente en el predio. En el caso de los burros y las vacas la cantidad de residuos disponibles ha sido verificada pesándolos directamente. Para los cuyes se ha utilizado un valor aproximado de 70 g/día cada animal. En el caso de la letrina es difícil dar una aproximación. Se ha utilizado



un valor de 400 gramos/día de excrementos y 1 litro/día de orina en media para cada persona. El estiércol producido por los animales no es constante durante el año, siendo directamente relacionado a la cantidad de alimento disponible. En particular: las cantidades que se han medido se refieren a la temporada de lluvia, en la cual los pastos crecen abundantemente. En la temporada seca al contrario hay una cierta escasez, y para nutrir los animales se usa forraje seco que se almacena durante la temporada de lluvia. En estos periodos podría verificarse una disminución en las cantidades alimentadas al digestor causando también una disminución en la producción de biogás. De todas maneras el dimensionamiento de los digestores (HRT y volumen) siempre se basa sobre las condiciones de alimentación máxima y temperatura mínima.

Dimensionamiento del digestor. Para facilitar los cálculos se utiliza una densidad de 1000 kg/m³ para todos los excrementos (a pesar que los excrementos con menos humedad sean menos densos). Las relaciones de dilución en principio son determinadas en manera tal que la mezcla resultante tenga una concentración de 10% TS. El %TS de los residuos no pudo medirse, y entonces se usaron datos de literatura [26], que reportan como apropiadas diluciones en volumen de 1:1 para el estiércol vacuno. Para el estiércol de cuy se hizo la hipótesis de una concentración de 40% TS, considerando que la limpieza de las jaulas se hace una vez a la semana, y que en este periodo disminuye la humedad del sustrato. El uso de la letrina conlleva el uso de una cierta cantidad de agua para permitir el flujo de los excrementos hacia el digestor. Tal cantidad depende del diseño de la letrina y de los hábitos de los usuarios, y no es de fácil previsión. El tiempo de retención se fijó en 80 días. En el dimensionamiento del digestor hay que considerar que una parte del mismo se dedica a la acumulación de parte del biogás producido: se fijó un valor del 20% del volumen total. Durante el uso del PTD este valor puede disminuir, hasta el 5-10%.

Tipo excremento	Cantidad diaria total (kg/día)	Dilución con agua (vol:vol)	Volumen de mezcla (l/día)
Vaca	10	1:1	20
Burro	8	1:1	16
Cuy	2	1:2.5	6
Humano	1.5 kg – 5 litros orina	Depende del uso	10
TOTAL	21.5 kg – 5 litros orina		52

Tabla 6-1 Calculo de la alimentación diaria del digestor de Chollocani.



Alimentación (l/día)	HRT (días)	Volumen lodo (l)	Volumen biogás	Volumen digester (l)
52	80	4160	20% vol. digester	5200

Tabla 6-2 Dimensionamiento del digester de Chollocani.

La mejor manera de usar el digester es cargándolo diariamente, utilizando excrementos frescos:

- Los excrementos amontonados sufren evaporación de los volátiles (VFA y NH_3), descomposición aeróbica y anaeróbica con pérdida al exterior de CO_2 y CH_4 . De esa manera disminuye el rendimiento último del sustrato y el poder fertilizante del biol. El CH_4 liberado contribuye al efecto invernadero global.
- Disminuye la cantidad de agua necesaria en la dilución.
- El establo se mantiene constantemente limpio, permitiendo una mejora de las condiciones higiénicas del predio. La carga del digester debería transformarse en una de las operaciones rutinarias del día.
- Se evita el riesgo de sobrecargas del digester, que pueden provocar inhibición de la AD por excesiva generación de VFA y NH_3 .

Construcción del PTD. El PTD se realizó con doble membrana plástica. La manga interior en LDPE simple, sin aditivos o estabilizadores, de 100 μm de grosor; la manga exterior en LDPE especial para invernaderos, estabilizado a los UV, de 200 μm de grosor. Este último se conoce en la zona con el nombre de Agrofilm, pero se desconocen otras propiedades importantes que el mismo podría tener: p. ej. tratamiento a los IR y copolimerización con EVA. Como aislante se usaron pedazos de bambú apoyados en las paredes laterales, a la distancia de 15 cm uno del otro. Luego se cubrió con una lámina de plástico, y se distribuyó aserrín, obteniendo una capa de 10-12 cm de grosor en la parte inferior, y un grosor de 3-5 cm en las paredes laterales.

Dimensiones del PTD. Respecto a las dimensiones que aparecen en el manual (Anexo A), el digester de Chollocani se instaló en una zanja de forma mucho más abierta y menos profunda (véase, [Ilustración 4-8,c]). El volumen es sobredimensionado del 20% respecto al valor de diseño [Tabla 6-3].



Diámetro de la bolsa	127.3 cm
Ancho inferior de la fosa (con aislante)	55 cm
Ancho superior de la fosa (con aislante)	160 cm
Profundidad media de la fosa (con aislante)	60 cm
Largo de la fosa	5 m
Volumen total digestor	6372 l
Pendiente del piso de la fosa	3%

Tabla 6-3 Dimensiones del PTD de Chollocani.



Ilustración 6-1 Bambú como protección y aislante para el PTD.

Construcción invernadero. El PTD se instaló bajo un invernadero. Se aprovechó la presencia de una pared en adobe paralela al PTD, para construir un invernadero tipo capilla, a dos aguas, con cobertura en Agrofilm [Ilustración 6-2].





Ilustración 6-2 PTD de Chollocani instalado bajo invernadero, y sistema de cubiertas móviles, mandadas desde el exterior por seguridad.

Carga inicial del digestor (start up):

- Volumen total: 5000 litros
- Agua: 3200 litros
- Estiércol vacuno: 1500 litros
- Sedimentos de laguna: 200 litros
- Rumen vacuno y ovino: 100 litros

Producción de biogás. Para acumular el gas producido se instaló una bolsa de LDPE aproximadamente del volumen de 1 m^3 , en una zona ventilada del establo [Ilustración 6-3]. Al cabo de dos-tres días después de la carga inicial, el digestor empezó a hincharse, signo que la fermentación había empezado. Midiendo el tiempo necesario al acumulador para llenarse por completo, y repitiendo en los dos meses de observación la medida de estos ciclos de vaciado-llenado, se ha obtenido una estimación de la velocidad de producción de biogás. La velocidad de producción se reporta como productividad volumétrica, la única que se puede calcular con los datos a disposición. Los valores de volumen se reportan como volumen en condiciones estándar (25° C , 1 atm), considerando que las mediciones se han efectuado a una presión atmosférica de 0.61 atm y a una temperatura media de 10° C , y aplicando al biogás la ley de los gases perfectos:

Velocidad media de producción de biogás: $0.19 \text{ m}^3 \text{ biogás} / (\text{m}^3 \text{ digestor} \cdot \text{día})$, (1 atm , 25° C)





Ilustración 6-3 Bolsa plástica acumuladora de biogás, con sistema para aumentar la presión.

Temperatura del digestor. A través de un termómetro de mínima/máxima se midieron los extremos de temperatura del lodo, durante los dos meses de observación, registrándose una T mínima de 18° C y una T máxima de 19° C. Hay que notar que los valores de temperatura pueden variar dependiendo de la zona¹ del digestor en el cual se pone el termómetro. En particular la capa superficial, que durante el día está expuesta a los rayos solares y al calor del invernadero, experimenta variaciones térmicas más elevadas.

¹ El termómetro es insertado dentro el digestor mediante un pequeño tubo de PVC, a través de su boca de carga, haciéndolo penetrar por un largo de aprox. un metro. Habiendo puesto pesos al termómetro, esto se queda en la parte más profunda. Esta es la parte más fría del digestor, entonces los datos reportados son una estima conservativa de la T media del lodo.



DIGESTOR COMUNIDAD CHOLLOCANI				
materiales utilizados	cantidad	unidad	precio unitario	precio total
DIGESTOR de 6300 litros				
manga de plastico en agrofilm, diametro 127 cm	7	metros	18	126
manga de polietileno de baja densidad, diametro 127 cm	7	metros	6	42
baldes usados	6		3	18
camaras de carro usadas	3		8	24
tuberías en PVC de 3/4 "	35	metros	2,5	87,5
llaves de paso en PVC	3		6	18
codos	13		1	13
tes	4		1,5	6
				334,5 total digestor
				53,10 costo digestor / m3
AISLANTE				
bambú de 90 cm	60		0,7	42
aserrín	0,5	m3	40	20
				62 total aislante
TAPA AISLANTE NOCTURNA				
frazadas usadas	7		5	35
soga de 1/4"	40	metros	0,7	28
				63 total tapa
INVERNADERO 6 X 2.50 metros				
Agrofilm	40	m2	5	200
palos rollizos de 3" X 180 cm	10		6	60
palos rollizos de 4" X 600 cm	1		20	20
palos rollizos de 5" X 250 cm	2		8	16
alambre galvanizado	5	kilos	6	30
clavos	3	kilos	4	12
listones de 1 y 1/2" X 1"	10	metros	3	30
				368 total invernadero
QUEMADOR				
Armazón en hierro usado	1			15
tubo galvanizado de 3/4"	15	cm		3
laminas galvanizadas	30 X 30	cm		4
	0			22 total quemador
MANO DE OBRA				
Construcción digestor	7	dias	10	70
Trabajos en hierro				20
				90 total mano de obra
				939,5 total instalación completa
				149,127 costo instalación / m3

Tabla 6-4 Detalles de materiales y costos del digestor instalado en la comunidad de Chollocani.

6.3. Digestor en la comunidad de Pabellones

El segundo digestor se instaló en el predio de Dueña Benita Ramos, situado en la comunidad campesina de Pabellones, a 2-3 km del poblado de Yanaoca. La familia es compuesta por 4 miembros (madre, abuela, 2 hijos), y sus actividades productivas son la



ganadería y la agricultura. Se crían una vaca (300 kg) y cerca de 50 cuyes. El agua llega al predio desde un reservorio de la comunidad a través de una tubería, y no existen problemas de escasez durante el año. La situación general y las varias hipótesis de cálculo son parecidas a la del caso precedente.

Consumo de energía. Para la cocción de alimentos: 10 - 12 kg/día de bosta. La energía eléctrica se usa principalmente para el alumbrado, una radio y una televisión. Tiene un coste de 0.2397 soles/kWh, dando un gasto mensual medio de 7 soles (29 kWh/mes). Usa un hoyo como letrina.

Dimensionamiento del digestor.

Tipo excremento	Cantidad diaria total (kg/día)	Dilución con agua (vol:vol)	Volumen de mezcla (l/día)
Vaca	5	1:1	10
Cuy	3.5	1:2.5	12
Humano	1.5 kg – 4 litros orina	Depende del uso	6.5
TOTAL	21.5 kg – 5 litros orina		28.5

Tabla 6-5 Calculo de la alimentación diaria del digestor de Pabellones.

Alimentación (l/día)	HRT (días)	Volumen lodo (l)	Volumen biogás	Volumen digestor (l)
28.5	80	2280	10% vol. digestor	2550

Tabla 6-6 Dimensionamiento del digestor de Pabellones.

Construcción del PTD. El PTD se realizó con LDPE simple, sin aditivos ni estabilizadores, del grosor de 100 µm. Para aumentar su durabilidad el PTD se realizó con tres capas de plástico. Como aislante también en este caso se usó bambú, con la diferencia que también el piso vino aislado mediante bambú. El invernadero es de tipo túnel, con cobertura en Agrofilm.



Dimensiones del PTD

Diámetro de la bolsa	64 cm
Ancho inferior de la fosa (con aislante)	50 cm
Ancho superior de la fosa (con aislante)	80 cm
Profundidad media de la fosa (con aislante)	60 cm
Largo de la fosa	8 m
Volumen total digestor	2570 l
Pendiente del piso de la fosa	2.5%

Tabla 6-7 Dimensiones del PTD de Pabellones*Carga inicial del digestor (start up):*

- Volumen total: 2300 litros
- Agua: 1300 litros
- Estiércol vacuno: 850 litros
- Sedimentos de laguna: 150 litros

Producción de biogás. Se ha seguido el mismo método de medición usado con el digestor de Chollocani.

Velocidad media de producción de biogás: 0.16 m³ biogás / (m³ digestor · día), (1 atm, 25° C)



DIGESTOR COMUNIDAD PABELLONES				
materiales utilizados	cantidad	unidad	precio unitario	precio total
DIGESTOR de 2600 litros				
manga de polietileno de baja densidad, diametro 64 cm	30	metros	3,5	105
tubo PVC 4"	2,5	metros	5	12,5
camaras de carro usadas	2	piezas	8	16
tuberias en PVC de 3/4 "	25	metros	2,5	62,5
llaves de paso en PVC	2	piezas	6	12
codos	8	piezas	1	8
tes	1	piezas	1,5	1,5
				217,5 total digestor
				costo digestor / 83,65385 m3
ASLANTE				
bambú de 80 cm	105	piezas	0,65	68,25
				68,25 total aislante
TAPA AISLANTE NOCTURNA				
lana oveja	25	kilos	5	125
manga polietileno baja densidad	8	metros	4	32
				157 total tapa
INVERNADERO 8.5 X 2.10 metros				
Agrofilm	30	m2	5	150
palos rollizos de 3" X 250 cm	8		8	64
alambre galvanizado	5	kilos	6	30
clavos	2	kilos	4	8
listones de 1 y 1/2" X 1"	8	metros	3	24
				276 total invernadero
QUEMADOR				
tubo galvanizado de 3/4"	15	cm		3
				3 total quemador
MANO DE OBRA				
Construcción digestor	6	dias	10	60
Trabajos en hierro				5
				65 total mano de obra
				total instalacion 786,75 completa
				costo instalación / 302,60 m3

Tabla 6-8 Detalles de materiales y costos del digestor realizado en la comunidad de Pabellones.





7. Discusión de los resultados experimentales

En este capítulo se intenta dar una primera evaluación de los resultados obtenidos en las dos instalaciones experimentales. Se evaluará:

- Producción de biogás obtenida y posibles soluciones para mejorar la eficiencia de la AD.
- Costes y beneficios de las instalaciones.
- Uso del biogás y eficiencia de los quemadores realizados.

7.1. Eficacia de los PTD

Los parámetros que se utilizan para describir la eficacia de un digestor son:

- Grado de conversión de la materia orgánica
- Reducción de los patógenos
- Estabilidad de las reacciones bioquímicas
- Velocidad de producción de biogás

La conversión de la materia orgánica se puede determinar solo cuando se disponga de mediciones del %VS en el influente y en el efluente, y no es el caso de esta investigación. Es un valor útil para determinar el grado de utilización de la materia orgánica y pero puede dar indicaciones interesantes solo cuando se confronte con el dato de la biodegradabilidad del sustrato. Por ejemplo, con un sustrato que presente una biodegradabilidad del 30% (caso de los excrementos vacunos, **Tabla 4-5**), un digestor que presente una reducción del %VS del 20% podría ser interpretado como ineficiente, mientras que en realidad está alcanzando el 67% de la conversión posible.

La reducción de los patógenos es un valor fuertemente dependiente de la temperatura, del tiempo de retención y de la clase de patógenos considerada. El uso sucesivo del efluente determina el grado de reducción deseado. Es fuera de los alcances de esta investigación evaluar las características del biol obtenido y los posibles riesgos de salud que puede determinar su uso. Como referencia se pueden usar los datos de literatura, considerando que los PTD instalados trabajan con un tiempo de retención de 80 días y a una temperatura de 18° C.



Bacteria	Thermophilic fermentation		Mesophilic fermentation		Psychophilic fermentation	
	53-55 °C		35-37 °C		8-25 °C	
	Fatality		Fatality		Fatality	
	Days	Rate (%)	Days	Rate (%)	Days	Rate (%)
Salmonella	1-2	100.0	7	100.0	44	100.0
Shigella	1	100.0	5	100.0	30	100.0
Poliviruses			9	100.0		
Schistosoma ova	hours	100.0	7	100.0	7-22	100.0
Hookworm ova	1	100.0	10	100.0	30	90.0
Ascaris ova	2	100.0	36	98.8	100	53.0
Colititre	2	$10^{-1} - 10^{-2}$	21	10^{-4}	40-60	$10^{-5} - 10^{-4}$

Tabla 7-1 Valores de reducción de la carga patógena en diferentes condiciones de AD [14].

La inestabilidad bioquímica de los digestores generalmente es causada por algún cambio repentino en las condiciones de operación: algunos reactores pueden ser más robustos que otros en encontrar un nuevo estado de equilibrio. A veces el usuario, a causa de cambios en sus actividades (compra de nuevos animales, nuevas actividades que producen residuos orgánicos), va cambiando la alimentación del digestor respecto a los parámetros de diseño, confiando excesivamente en las capacidades de estabilidad del digestor. El caso típico es un aumento en el OLR (organic loading rate), es decir una sobrealimentación del digestor, que a la vez puede dividirse en sobrealimentación de sólidos suspendidos (SS) o de sólidos disueltos (SD). Un aumento en SS puede determinar un aumento de la sedimentación al interior del digestor, causando disminución del tiempo de retención y eventual washout. Un aumento en SD causa un inmediato desequilibrio en las fases de la AD, pudiendo determinar un acumulo de VFA, disminución de pH y inhibición de la fase metanogénica. Este tipo de inestabilidad es entonces evitable cuando se observe una cierta regularidad en la alimentación del digestor. En los dos meses de observación no hubo algún cambio de este tipo, así que no es posible traer alguna conclusión.

Otro aspecto que puede causar inestabilidad en el funcionamiento del digestor son las oscilaciones de temperatura del lodo, como ya se ha discutido en el apartado 2.3.1. En los digestores realizados en la investigación los únicos cambios notables de temperatura se verifican en la superficie del lodo expuesta a la radiación solar. Intuitivamente se puede decir que tales oscilaciones son tales da bloquear cualquier actividad metanogénica. Sería interesante calcular con el auxilio de una simulación numérica el perfil de temperaturas de los primeros estratos del lodo para evaluar la dimensión de esta zona de inactividad. La actividad de las otras fases de la AD (hidrólisis, acidogénesis) es menos influenciada por los cambios de temperatura y entonces seguirá una cierta producción de sustancias solubles y VFA; considerando que haya una cierta difusión de estos productos entre los



estratos superficiales y los más profundos del lodo, puede ser que el efecto de una inhibición de la metanogénesis en la superficie sea globalmente insignificante.

La velocidad de producción de biogás es el parámetro que determina la rentabilidad del digestor. Bajos valores de velocidad ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^3 \text{ digestor/día}$) determinan que para satisfacer las exigencias energéticas de los usuarios sea necesario construir un digestor más grande, con obvio aumento del capital inicial. **El valor medio obtenido en la investigación ha sido de $0.18 \text{ m}^3 \text{ biogás} / \text{m}^3 \text{ digestor} / \text{día}$.** Es posible confrontar este valor con algunos valores que se encuentran en la literatura para digestores que operan a temperaturas análogas [Tabla 7-2]. La productividad de los PTD realizados es más alta que la de las lagunas anaeróbicas y es en línea con algunos digestores rurales. Estos confrontes son solo orientativos, ya que la composición del sustrato no es reportada.

Substrate used	Digester type	Initial TS/VS (%)	Inoculum used (% w/v)	HRT (days)	Temperature (°C)	Gas yield	Methane content (%)	Reduction in VS (%)	Reduction in TS (%)	Reduction in BOD/ COD (%)	Reference
Sewage	UASB reactor	NS	NS	0.19	13–25	NS	NS	NS	NS	70 COD	Uemura and Harada (2000)
Sewage	UASB reactor	NS	NS	8.5	7–32	NS	NS	NS	NS	90	Seghezzi et al. (1998)
Dairy manure	KVIC biogas plant	NS	NS	NS	12	99 l/day	NS	NS	NS	NS	Kalia and Singh (1996)
Night soil	Floating dome type (25 l)	NS	NS	25	10	69.72 l/kg VS/day	73	NS	NS	NS	Singh et al. (1995)
Cattle dung	Rubber balloon and Deenbandhu (2 m ³)	9 (TS)	NS	55	9–25	0.92 and 1.23 m ³ /m ³ /day	54.3 and 55.7	32.5 and 39.7	37.5 and 44.3	NS	Kanwar and Guleri (1994)
Human waste	Fixed dome digester	5.2/4.6	NS	30	15	0.19 m ³ /m ³ /day	57	81	77	97/40	Meher et al. (1994)
Night soil	Floating dome 25 l	10 (TS)	NS	25	20	44 l/day	NS	57	48	80/54	Singh et al. (1993)
Night soil	Serum vials (120 ml)	1.8–10.62 VS	50	NS	5–30	NS	12% at 5 °C, 66% at 30 °C	NS	NS	NS	Singh et al. (1993)
Cattle manure	Continuous flow system	NS	50	Above 40	5–10	NS	NS	NS	NS	NS	Zeeman et al. (1988)
Swine manure	Anaerobic lagoon with floating cover	NS	NS	50	11–22	0.11–0.15 m ³ /m ³ /day	NS	NS	NS	NS	Chandler et al. (1983)
Swine and dairy manure	Anaerobic lagoon	NS	NS	NS	14	0.006 m ³ /m ³ /day	NS	NS	NS	NS	Allen and Lowery (1976)

NS—not specified.

Tabla 7-2 Características operacionales de algunos digestores operantes a temperaturas psicrófilas [53].

7.2. Métodos para aumentar la productividad del PTD

Considerando que una familia puede necesitar hasta 2m^3 biogás para satisfacer sus necesidades energéticas básicas (cocción alimentos y calentamiento agua), **con los valores de productividad encontrados en la investigación se necesitaría un digestor de 10 m^3** , valor suficientemente exagerado en términos de coste y espacio para permitir una difusión de la tecnología en la zona geográfica investigada.

Existen algunas técnicas que no han sido experimentadas en esta investigación y que pueden ayudar para aumentar la productividad del PTD.



Uso de aditivos. Hojas de plantas, residuos agrícolas, partes de hortalizas, son todos sustratos que mejoran la producción de biogás. Mejor usar material vegetal joven (menor contenido en lignina) y posiblemente someterlo a algún tipo de pretratamiento: en solución alcalina (1% NaOH) para 5-7 días o triturándolo. Otras experiencias reportan el uso de algunas sustancias en cantidades mínimas, pero con resultados casi milagrosos: el aumento del 40-80% en la producción de biogás cuando se añadió el 1% de residuos de cebolla en la digestión de excretas vacunas (Sharma, 2002, citado en [95]). La importancia de los aditivos ha sido explicada por un mecanismo de adsorción entre residuo y aditivo, que crea un punto de alta concentración de materia orgánica y un mejor ambiente para el crecimiento bacteriano.

El uso de microorganismos psicrófilicos ya ha sido comentado precedentemente (¿). La adaptación de los microorganismos al interior del digestor es un mecanismo lento y solo podrá evaluarse a lo largo de la operación del digestor. El mecanismo de adaptación tendrá más efectos cuando se junte con mecanismos de retención de la biomasa o con el recirculo del efluente.

Recirculo del biol. Recircular parte del efluente (biol) en la alimentación es una estrategia para acelerar la creación de una microflora adaptada a las condiciones del digestor y aumentar la producción de biogás, ayudando en casos de escasez de alimentación. Entonces es aconsejable usar el biol como sustitución del agua de dilución sobre todo en los periodos del año cuando es menor la necesidad de fertilizantes.

Variación en los parámetros de operación del PTD. El efecto de la temperatura ya ha sido ampliamente tratado en 2.3.1. Con las temperaturas de lodo alcanzadas (18° C), probablemente el tiempo de retención escogido (80 días) es excesivo, y eventualmente se podría bajar a 50-60 días. Además hay que considerar que en el PTD existen fenómenos de estratificación parcial de los sólidos (scum y sedimentos) que aumentan diferencialmente los tiempos de retención. El tubo de salida de un PTD se encuentra en la parte media del lodo, entonces los sólidos contenidos en lo scum y en los sedimentos salen del digestor a un ritmo más lento, y tienen más tiempo para la degradación.

Shyam [96] alimentó un digestor tipo chino con un %TS del 18%, valor más elevado de los normalmente recomendados, obteniendo valores de producción de biogás más elevados y sin problemas de inhibición (T= 9°-35° C). Además el mismo Shyam aconseja un sistema para medir la %TS útil en ciertas situaciones. Se hace una bola con estiércol vacuno (12.5 cm de diámetro) y se pone sobre un plano: si la bola pierde su forma esférica entonces tiene un %TS menor del 18% y puede ser alimentada sin dilución en el digestor. Las únicas modificaciones previstas son en las dimensiones de los tubos de cargas y descargas que van aumentados considerablemente a causa de la mayor viscosidad del lodo. Esta solución



es bastante interesante y podría experimentarse con el PTD, consintiendo un menor volumen del mismo.

Pretratamiento del sustrato. En el caso de sustratos vegetales puede usarse pretratamiento ácido o alcalino, mientras se desaconsejan para tratar excrementos ya que la cantidad de álcali o de ácido añadida para alcanzar una concentración efectiva sería excesiva. Otra solución es una pre-digestión del sustrato en un tanque más pequeño, calentado con un sistema de colectores solares, con un tiempo de retención de 2-3 días (al menos 30-35° C). Las dimensiones de este sistema son reducidas: es posible construir el tanque sobre el nivel del suelo, aislarlo adecuadamente y utilizar la convección natural de los colectores. Es una especie de digestión two-phase, y que podría mejorar bastante la degradabilidad de un sustrato rico en celulosa como el estiércol vacuno (véase **Tabla 4-7**), además de aumentar la temperatura del lodo dentro el PTD.

El uso de biofilms para la retención de la biomasa al interior del digestor es una solución ventajósísima para disminuir el HRT de la AD sobretodo a bajas temperaturas, pero pueden funcionar solo con sustratos diluidos y sin partículas de excesivo tamaño. En el caso, sería posible experimentar con bambú.

7.3. Eficiencia de los quemadores realizados

La eficiencia global de una cualquier estufa puede medirse una vez que se conozca la cantidad de combustible consumado y la cantidad de calor que ha pasado a la cazuela. Existe un test estándar (water boiling test (WBT)) para evaluar la OE de las estufas :

$$OE = \frac{m_{w,i} \cdot C_{pw}(T_e - T_i) + m_{w,evap} \cdot H_l}{m_f \cdot H_f} \quad (\text{ec. 7.5})$$

donde $m_{w,i}$ es la masa de agua inicial en el contenedor (kg), $C_{p,w}$ calor específico del agua ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), $m_{w,evap}$ masa de agua evaporada durante el test (kg), H_l calor latente de evaporación del agua ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), T_i temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{C}$), T_e temperatura de ebullición del agua ($^{\circ}\text{C}$), m_f masa de combustible consumada durante el test (kg), H_f poder calorífico inferior del combustible ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). En este test la cantidad de vapor producido es considerado como energía útil, y esto puede resultar en resultados de eficiencia ambiguos. Otro parámetro que puede ser utilizado para verificar la eficiencia de una estufa es el consumo específico de combustible (CSF), y se refiere a la cantidad de combustible utilizado para cocinar una determinada comida.

Durante la investigación se han realizado algunas pruebas de cocción para verificar el funcionamiento de los quemadores realizados. El flujo de suministro de biogás a los



quemadores venía estimado por las variaciones en volumen de las bolsas de almacenamiento respecto a la durada de la experiencia. Un valor importante que se desconocía es el % CH₄ en el biogás: se usa el valor clásico de 60% CH₄.

Se ha medido la cantidad de biogás necesaria a llevar a ebullición una dada cantidad de agua, obteniendo valores de eficiencia entre 25 – 30%

5 l agua, 300 l biogás (1 atm, 0° C), 70 min.

0.5 l agua, 26 l biogás (1 atm, 0° C), 6 min.

En [14] se encuentran valores de eficiencia del 45 – 50 % para las mismas cantidades de agua, y en el caso de “5 l agua” en la mitad del tiempo. Largos tiempos para obtener la ebullición del agua implican altas pérdidas de calor por las paredes de la olla y entonces una menor eficiencia global del quemador. Evidentemente hace falta mejorar mucho el diseño de la estufa para limitar estas pérdidas de calor. Puede ser también que el biogás contenga un bajo porcentaje de CH₄.

7.4. Análisis económico de los PTD realizados

El asunto subyacente a los análisis coste-beneficios es que el usuario adoptará una nueva tecnología solo cuando espere obtener un mejoramiento en su condición financiera. Este tipo de impostación muestra todos sus límites en el caso de los digestores anaeróbicos, ya que la mayoría de los efectos causados por la instalación de un digestor son difícilmente monetizables. Al contrario, algunos beneficios de un digestor rural son relacionados a aspectos que afortunadamente no tienen nada que ver con los flujos monetarios de una familia, y son más bien relacionados al concepto ambiguo de calidad de vida:

- Disminuye el tiempo empleado para un trabajo rutinario y fatigoso como es la recolección y preparación de la bosta.
- Mejoran las condiciones higiénicas y estéticas del predio, ya que los residuos son constantemente alimentados al digestor. En ambos los casos analizados la familia carecía de una letrina; el digestor de Pabellones se completó con una letrina desde el comienzo de la operación del digestor.
- Mejora el ambiente de la cocina, ya que el uso del biogás elimina los efectos nocivos de la combustión de la bosta en estufas rudimentarias. La cocción con bosta necesita un continuo control y alimentación de la llama, mientras el uso del biogás permite desarrollar otras actividades paralelas.



- El digestor es un símbolo de bienestar y de avance social para la familia que lo posea.

Flujos monetarios pueden determinarse cuando la familia esté comprando los combustibles para sus necesidades energéticas, y en este caso el biogás producido permite disminuir o incluso anular estos gastos. El mismo discurso vale para la compra de fertilizantes que pueden venir sustituidos con el biol (pero en este caso es más difícil establecer una equivalencia entre el efecto de los fertilizantes comerciales y el biol). Se puede decir que el análisis monetario tenga sentido solo en estos casos.

7.4.1. Análisis coste-beneficio del digestor de Cholloani

Evidentemente este análisis económico es muy parcial ya que se basa sobre los valores de los dos primeros meses de funcionamiento. La durada del plástico es una incógnita y de hecho una durada inferior a los dos años disminuiría altamente la posibilidad de difusión del PTD.

Evaluación de los productos del digestor

Biogás. Su valor monetario se calcula comparando su poder calorífico a un combustible de calidad como el gas de bombona (GPL) (que por ejemplo ya es utilizado por los productores de yogurt de la microcuenca).

Combustible	Poder calorífico
Biogás	21.6 MJ/m ³
Bosta	11 MJ/kg
Residuos agrícolas	12.6 MJ/kg
Leña	16.75 MJ/kg
Carbón vegetal	29.73 MJ/kg
Kerosén	36.26 MJ/kg
GPL	46 MJ/kg

Tabla 7-3 Poder calorífico de algunos combustibles difundidos en zonas rurales

Poder calorífico biogás (60% metano): 21.6 MJ/Nm³

Poder calorífico GPL: 46 MJ/kg



Eficiencia quemador biogás: 50%

Eficiencia quemador GPL: 60%

Se usa el valor óptimo de eficiencia del quemador de biogás y del GPL, porque aquí se quiere evaluar la rentabilidad del solo digestor. Quemadores con eficiencia del 50% existen y no hay razón por las cuales no se puedan conseguir también en este caso.

Entonces:

1 Nm³ biogás = 0.39 kg GPL

1 kg GPL = 2.56 Nm³ biogás

El precio de una botella de GPL de 10 kg en Yanaoca es de 36 nuevos soles. Se obtiene entonces un valor monetario para el biogás de 1.4 soles/Nm³ biogás.

Producción. La producción de biogás en la instalación de Chollocani en los dos primeros meses de funcionamiento ha sido en media: 0.19 Nm³ biogás/m³ digestor/día

Beneficio anual = 485.5 soles/año

Biol. Sin valor monetario.

Coste de la instalación

Instalación completa: 939.5 soles

Coste del mantenimiento del digestor

Agua, excrementos, trabajo humano: sin valor monetario.

Por lo visto, al menos en las comunidades visitadas durante la investigación, hay suficiente agua para la preparación de la carga diaria del digestor, y su mayor consumo no implica un gasto monetario para los usuarios. En ausencia del digestor, los usuarios destinaban los excrementos recolectados a la preparación de bosta o de abono. La digestión anaeróbica permite un utilizzo más eficiente de los recursos, obteniendo al mismo tiempo energía y abono.

Manutención de los materiales.

Probablemente la parte menos duradera de la instalación es la lámina de plástico con la cual es construido el digestor. Faltando datos sobre estos tipos de instalaciones, se usan valores conservativos (de baja duración de los materiales)



Plástico del digestor: 2 años

Plástico del acumulador de gas: 1 año

Plástico del invernadero: 5 años

Evaluando el precio de los nuevos materiales, obtenemos:

Manutención: 136.5 soles/año

Vida útil de la instalación

Con una buena manutención la instalación es prácticamente “eternamente renovable”, es decir no existen daños de tal gravedad que obliguen su abandono. El cambio del plástico ha sido incluido en la parte de manutención.

Vida útil: 20 años

Análisis económica estática (payback)

Beneficios Netos Anuales = Ingresos – Costes = 349 soles/año

Recupero de la inversión inicial = $939.5 / 349 = 2.69$ años = 2 años y 8 meses





8. Impacto ambiental de las instalaciones realizadas

Las condiciones ambientales pueden verse ampliamente mejoradas por la implantación de un digestor. En primer lugar tendremos que, en zonas donde se consume leña por encima de la capacidad de regeneración del bosque, el digestor reducirá la tala de árboles, por lo que se evitará la deforestación y se mejorará el entorno [7].

Un beneficio a nivel más global es el de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos gases provienen de la fermentación descontrolada de la materia orgánica en forma de metano o óxidos nitrosos (gases de alto efecto invernadero, 24,5 y 320 veces mayores que el dióxido de carbono respectivamente) o de la quema de recursos fósiles (aumentando la concentración de CO₂ en la atmósfera). El biogás evita la fermentación de la materia orgánica por un lado, ahorra en combustible fósiles y preserva los sumideros de captación de carbono [7]. La producción de fertilizante orgánico (biol) evita el uso de fertilizantes químicos, que necesitan de combustibles fósiles para su producción. Se ha calculado que un digestor de 5 m³, construido en Nepal, en condiciones climáticas y de utilización parecidas a las de esta investigación, causa una disminución 4.6 tCO₂ equivalentes/año en las emisiones de gases invernadero [97].

La construcción de un PTD emplea en gran parte materiales plásticos (LDPE para el cuerpo del digestor y PVC para las tuberías). Estos materiales necesitan de combustibles fósiles para su síntesis (energía y material de síntesis). La cantidad absoluta de material plástico utilizada no es pero elevada: cerca de 5kg LDPE para un digestor de 5 m³. Durante la vida útil del digestor se recupera abundantemente la cantidad de energía empleada para su construcción.

Aunque Perú no sea un país desarrollado que se vea afectado por el Protocolo de Kyoto y la reducción de emisiones, existe un potencial de ingresos económicos en este sentido a partir del comercio en mercados internacionales de los derechos de emisiones (véase el anexo B).





9. Presupuesto de la investigación

En este capítulo se presentan los gastos principales que han sido necesarios para llevar a cabo la investigación (tasa de cambio aplicada: 1€=4.2 nuevos soles).

Desplazamiento a Perú

<i>Concepto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Financiación</i>
Billete avión ida y vuelta	900 €	CCD
Seguro médico	400 €	CCD
Vacunas y fármacos	120 €	CCD

Estadía en Perú

<i>Concepto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Financiación</i>
Transportes internos	250 €	CCD
Alojamiento en Lima (3 meses)	300 €	Gasto cubierto por el autor
Alimentos en Lima (3 meses)	360 €	Gasto cubierto por el autor
Alojamiento en la región del Cuzco (4 meses)	300 €	IAA
Alimentos en la región del Cuzco (4 meses)	340 €	IAA

Investigación

<i>Concepto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Financiación</i>
Construcción de dos digestores	411 €	50% IAA, 50%



(material y mano de obra)		GRUPO
Elaboración manual de construcción del digestor tubular	170 €	GRUPO

Se puede también considerar el gasto del personal investigador, considerando las horas de trabajo de campo (480 h) y un sueldo de becario (6 €/h): en este caso el trabajo se ha desarrollado bajo un concepto de práctica voluntaria no remunerada.

Trabajo de investigación	2880 €	Gasto cubierto por el autor
--------------------------	--------	-----------------------------

Presupuesto total de la investigación = 6431 €

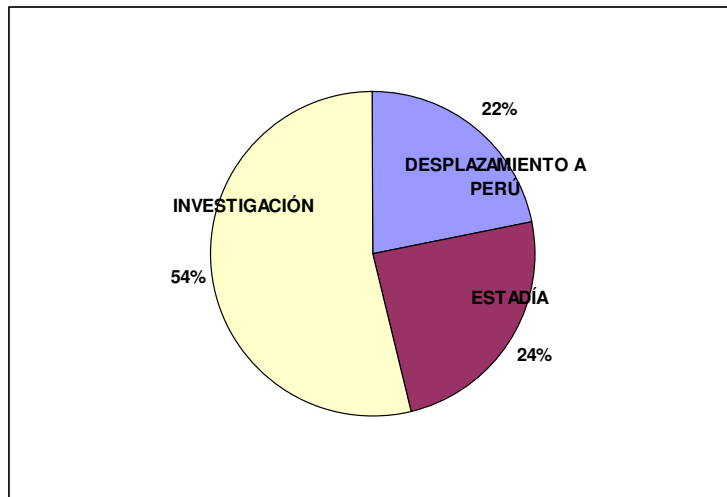


Gráfico 9-1 Repartición del presupuesto según concepto.

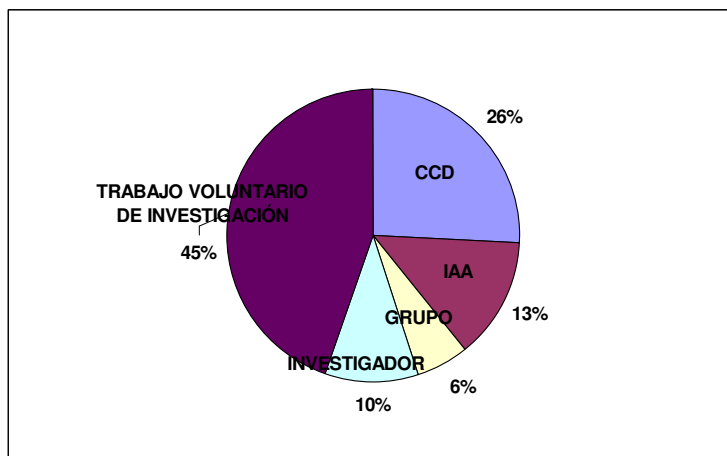


Gráfico 9-2 Repartición del presupuesto según el origen del financiamiento.



Conclusiones

Los resultados obtenidos impulsan a la búsqueda de un diseño mejor. Eventualmente el diseño actual puede resultar atractivo para algunos casos puntuales, pero difícilmente podrá difundirse a la típica unidad familiar. El precio de la instalación completa (10 m³) es todavía demasiado elevado (> 400 US \$) para una familia que tiene unos ingresos medios mensuales de 60-80 US \$. De todas maneras cualquier evaluación más precisa necesita del dato de duración del plástico. El invernadero ha demostrado ser una solución eficiente al aumentar la temperatura del lodo, pero su influencia sobre el coste total de la instalación es elevada (40%). Puede experimentarse con un diseño de invernadero de dimensiones más reducidas y cobertura nocturna externa.

Los materiales utilizados en la construcción del PTD y del invernadero influyen grandemente las propiedades térmicas del sistema y de durada del digestor, y deben ser analizados y escogidos cuidadosamente.

Inocular con sedimento lacustre y recircular el efluente en la alimentación son prácticas que aumentan la concentración de bacterias psicrófilas y psicrotrofas al interior del digestor, y se piensa que esto aumente la productividad del digestor.

La adopción del PTD permite aumentar la integración del sistema agropecuario, consintiendo una mayor autonomía en la producción de energía y de alimentos. En concreto deben buscarse aplicaciones al biol que se produce en abundancia y que puede ser de difícil manejo. Cultivo de forraje hidropónico, algas, peces son unas opciones posibles que hay que investigar.

El quemador debe ser estandarizado para una cierta presión y completado en su diseño para disminuir las pérdidas de calor.

La importancia que tiene la toma de decisiones colectivas en ciertas comunidades, la posibilidad de presupuesto participativo es un factor que puede promover la difusión del PTD en el momento sea clara su utilidad a los ojos de los pobladores.





Bibliografía

- [1] MSP-REDESA-INCAGRO-IAA, *Intervenciones Exitosas para Promover Oportunidades Productivas en la Sierra Rural – Informe Final*, Lima, 2006
- [2] TORRE POSTIGO C. *Kamayoq: promotores campesinos de innovaciones tecnológicas*, Lima: ITDG LA, 2004
- [3] VELO GARCÍA E. *Aprovechamiento energético de la biomasa*, en: Energía, participación y sostenibilidad, Ingeniería sin Fronteras, Barcelona, 2006
- [4] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT (GTZ) GMBH *La Implementación de Cocinas Saludables como Intervención Clave en el Mejoramiento de la Salud Ambiental en los Andes*, Lima (s.f.)
- [5] PRESTON T. R., RODRÍGUEZ L. *Low-cost biodigester as the epicenter of a ecological farming systems*. Proceedings biodigester workshop, 2002.
[\[http://www.mekam.org/probiol/pres.htm\]](http://www.mekam.org/probiol/pres.htm)
- [6] WARBURTON K. *Integrated biosystems for sustainable development*. Proceedings of National Workshop on Integrated Food Production and Resource Management, 2000
- [7] JARAUTA L., *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos-El caso de Perú*. PFC, ETSEIB, 2005, Barcelona
- [8] WERNER U. ET AL. *Biogas plants in animal husbandry*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1989
- [9] INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY. GTZ PROJECT. *Biogas Digest. Volume I. Biogas Basics* (s.f.)
- [10] MARSH M. (Chief Executive Officer), *Biomethane from Dairy Waste - A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*, Western United Dairymen, 2005 [\[http://www.suscon.org/news/biomethane_report/Full_Report.pdf\]](http://www.suscon.org/news/biomethane_report/Full_Report.pdf)
- [11] HOUWELING ET AL, *Trace Gases: Current Observations, Trends, and Budgets*. CLIMATE CHANGE 2001. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME.
[\[http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/134.htm#4211\]](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/134.htm#4211)
- [12] CARRILLO L. *Microbiología Agrícola*. Capítulo 5, Universidad Nacional de Salta, 2003
[\[http://www.unsa.edu.ar/matbib\]](http://www.unsa.edu.ar/matbib)
- [13] SCHINK, B. *Energetics of Syntrophic Cooperation in Methanogenic Degradation*. Microbiology and molecular biology review. 61. No.2 (1997) 262-280



- [14] LUOSTARINEN S., *Anaerobic on site wastewater treatment at low temperature*, University of Jyväskylä, 2005 [<http://dissertations.jyu.fi/studbiol/951392274X.pdf>]
- [15] KALLE G.P., MENON K.K.G. *Inhibition of methanogenesis and its reversal during biogas formation from cattle manure*. J. Biosci., Vol. 6, Number 3, September 1984, pp. 315–324
- [16] B. F. PAIN ET AL., *Mesophilic Anaerobic Digestion of Dairy Cow Slurry on a Farm Scale: First Comparisons between Digestion Before and After Solids Separation*, J. agric. Engng Res. (1984) 29, 249-256
- [17] DENNIS A., BURKE P.E., *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook*, Environmental Energy Company, 2001
[<http://www.makingenergy.com/Dairy%20Waste%20Handbook.pdf>]
- [18] MARCHAIM R., *Biogas process for sustainable development*, FAO, Roma, 1992
- [19] G.N. DEMIRER, S. CHEN, *Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure*, Process Biochemistry 40 (2005) 3542–3549
- [20] LETTINGA G. ET AL., *Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment*, TRENDS in Biotechnology 19 (2001)
- [21] ALVARÉZ R. ET AL., *Biogas production from llama and cow manure at high altitude*, Biomass and Bioenergy, 2005
- [22] SILVESTRONI P., *Fondamenti di chimica*, Masson, Milano, 1992
- [23] MASSÉ D. ET AL., *The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure*, Bioresource Technology 89 (2003) 57–62
- [24] GERARDI M. H., *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [25] THE AGSTAR PROGRAM, *AGSTAR handbook and software, chapter 1*, U.S. Environmental Protection Agency
[<http://www.epa.gov/agstar/resources/handbook.html>]
- [26] SASSE L., *Improved biogas unit for developing countries*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, 1991
- [27] BUI XUAN AN, *Biogas technology in developing countries: Vietnam case study*, Proceedings biodigester workshop, March 2002
[<http://www.mekarn.org/procbiobd/an.htm>]
- [28] L. RODRIGUEZ, T. R. PRESTON, *Biodigester installation manual*, [<http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGAP/FRG/Recycle/biodiq/manual.htm>]



- [29] RUTAMU I., *Low cost biodigesters for zero grazing smallholder dairy farmers in Tanzania*, *Livestock Research for Rural Development* 11 (2) 1999 [<http://www.lrrd.net/search/lrrd/lrrd11/2/inno112.htm?q=biodigester>]
- [30] POUND B. ET AL., *Characteristics of production and function of a 15 cubic meter Red-Mud PVC biogas digester*. *Tropical Anim. Prod.* 6: 146-153, 1981 [http://www.fao.org/ag/AGA/AGAP/FRG/TAP62/62_146.pdf]
- [31] DAVIS C.H, PRESTON T., *A combined digester and gasholder PVC plastic tube biogas unit*, *Adab News* 35, 1982
- [32] BUI PHAN THU HANG, *Effect of dimensions of plastic biodigester (width:length ratio) on gas production and composition of effluent*, *Livestock Research for Rural Development* 15 (10) 2003, [<http://www.mekarn.org/msc2003-05/miniprojects/webpage/hangctu.htm>]
- [33] SAN THY ET AL., *Effect of length: diameter ratio in polyethylene biodigesters on gas production and effluent composition*. *Livestock Research for Rural Development* 17 (11) 2005, [<http://www.lrrd.net/search/lrrd/lrrd17/11/sant17120.htm?q=biodigester>]
- [34] INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY. GTZ PROJECT. *Biogas Digest. Volume II. Biogas - Application and product development* (s.f.)
- [35] BUI XUAN AN ET AL., *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.cipav.org.co/lrrd/lrrd9/2/an92.htm>]
- [36] FOO J. (editor), *Proceedings of the IBSnet Electronic Seminar: How to install a polyethylene biogas digester*, International Organization of Biotechnology and Bioengineering, 2001 [<http://www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/ibs/ibsnet/e-seminar/FranciscoAguilar/index.html>]
- [37] MOOG F. A. ET AL., *Promotion and utilization of polyethylene biodigester in smallhold farming systems in the Philippines*, en: *Integrated Bio-Systems in Zero Emissions Applications*. *Proceedings of the Internet Conference on Integrated Biosystems*, 1998 [<http://www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/et-w10/etw10topic.htm>]
- [38] BRIASSOULIS D. ET AL., *Degradation Characterisation of Agricultural Low-density Polyethylene Films*, *Biosystems Engineering* (2004) 88 (2), 131–143
- [39] DILARA P., BRIASSOULIS D., *Degradation and Stabilization of Low-density Polyethylene Films used as Greenhouse Covering Materials*, *J. agric. Engng Res.* (2000) 76,
- [40] NEEDHAM. A., *The service life of polyethylene geomembrane barriers*, *Engineering Geology* 85 (2006) 82–90
- [41] KAY D. ET AL., *GEOSYNTHETICS DURABILITY: A POLYMER CHEMISTRY ISSUE*, en: 57TH CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2004 [<http://www.infogeos.com/files/news/document/G37.994.pdf>]



- [42] BRIASSOULIS D. ET AL., *Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses Part 2 : Quality Assessment*, J . agric . Engng Res . (1997)
- [43] EL-HALWAGI, M. M. (editor) *Biogas Technology, Transfer and Diffusion. Proceedings of the International Conference held at the National Research Centre, Dokki, Cairo, Egypt, 17-24 November 1984*. Elsevier Applied Science Publishers (s.f.)
- [44] POPOV, E. P., *Mechanics of Materials*, Second Edition, Prentice-Hall, Inc.: New Jersey, 1976.
- [45] ZARATTI SACCHETTI F., FORNO GISBERT R., *La radiación ultravioleta en Bolivia*, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, La Paz, 2003 [<http://www.ops.org.bo/textocompleto/nsa21096.pdf>]
- [46] LAGRANGE B. *Il Biogas*. Milano, Longanesi, (s.f.)
- [47] DATONG Z., *An Analysis of Domestic Biogas Storage Installations in China*, Biomass 20 (1989) 61-67
- [48] COSTIGAN M. G., *Hydrogen sulfide: UK occupational exposure limits*, Occup. Environ. Med. 2003
- [49] LES GORNALL, en: <http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/h2sd.htm>
- [50] FONTANA F., *Fermentación anaeróbica de desechos orgánicos en el altiplano*, PHI/UNESCO (s.d), [<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/fontana.pdf>]
- [51] *Atmospheric pressure*, en: http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_pressure
- [52] ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DEL PERÚ, *PROYECTO PER/98/G31: ELECTRIFICACIÓN RURAL A BASE DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL PERÚ*, Lima, 2003
- [53] KASHYAP D. R., *Biomethanation under psychrophilic conditions: a review*, Bioresource Technology 87, 2003
- [54] SINGH P. P. ET AL., *COMPUTER MODEL FOR PERFORMANCE PREDICTION AND OPTIMIZATION OF UNHEATED BIOGAS PLANT*, Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 1/2, pp. 51-63, 1998
- [55] LINDORFER H., *Self-heating of anaerobic digesters using energy crops*, BOKU, Wien, (s.f.) [<http://www.iea-biogas.net/Dokumente/memberpublications/Lindorfer.pdf>]
- [56] FAO, OFICINA REGIONAL PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, *Reciclaje de materias organicas y biogas*, Santiago de Chile, 1986
- [57] KANWAR S., GULERI, *PERFORMANCE EVALUATION OF A FAMILY-SIZE, RUBBER-BALLOON BIOGAS PLANT UNDER HILLY CONDITIONS*, Bioresource Technology 50 (1994)



- [58] SAN THY ET AL. *Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent*. *Livestock Research for Rural Development* 15 (7) [<http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd15/7/sant157.htm>]
- [59] AXAOPOULOS ET AL., *SIMULATION AND EXPERIMENTAL PERFORMANCE OF A SOLARHEATED ANAEROBIC DIGESTER*, *Solar Energy* Vol. 70, No. 2, 2001
- [60] YADAV Y. P., *An improved solar assisted plant: a transient analysis*, *Energy Convers. Mgmt* Vol. 27, No. 2, 1987
- [61] M. S. SODHA ET AL., *Effect of PVC greenhouse in increasing the biogas production in temperate cold climatic conditions*, *Energy Convers. Mgmt* Vol. 27, No. 1, 1987
- [62] USMANI J. A., *Performance characteristic of a greenhouse integrated biogas system*, *Energy Convers. Mgmt* Vol. 37, No. 9, 1996
- [63] WHITE R. A., *The Role of Biogas in Rural Development and Resource Protection in China: A Case Study of Lijiang Municipality, Yunnan Province, China*, P.R.E.M.I.U.M., (s.f.)
- [64] South-North Institute for Sustainable Development, *"4-in-1" Biogas system in Northern China*, (s.f.) [www.snisd.org.cn/enhtm/four-in-one%20biogas%20technology.doc]
- [65] PAPADAKIS G. ET AL., *Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials*, *J. agric. Engng Res.*, 2000
- [66] NIJSKENS J. ET AL. , *HEAT TRANSFER THROUGH COVERING MATERIALS OF GREENHOUSES*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 33 (1984)
- [67] SHUKLA A., *Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth-air heat exchanger*, *Building and Environment* 41, 2006
- [68] DIN M. ET AL., *Effect of thermal storage on the performance of greenhouse*, *Int. J. Energy Res.* 2003
- [69] ROBERTS V. J., *MOVABLE THERMAL INSULATION FOR GREENHOUSES*, *NJAES Research Paper* No. P03130-01-81, 1981 [<http://aesop.rutgers.edu/~horteng/ppt/papers/MovableCurtain.pdf>]
- [70] ANAND R. C., SINGH R., *A Simple Technique, Charcoal Coating Around the Digester, Improves Biogas Production in Winter*, *Bioresource Technology* 45, 1993
- [71] HILL D. T., *Simulation of low temperature anaerobic digestion of dairy and swine manure*, *Bioresource Technology* 78, 2001
- [72] STEFFEN R. ET AL. *Feedstocks for Anaerobic Digestion*, *University of Agricultural Sciences Vienna*, 1998 [<http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d8feed.pdf>]
- [73] HARRIS P. en: [<http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/Biogas%20Production.pdf>]



- [74] ARNOTT M. *The Biogas/Biofertilizer Business Handbook*, Peace Corps, 1985
- [75] LES GORNALL, en: <http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/LG2.html>
- [76] NUTRIENT MANAGEMENT TECHNICAL NOTE NO. 1, *Effects of Diet and Feeding Management on Nutrient Content of Manure*, USDA, 2003
[\[http://www3.abe.iastate.edu/wastemgmt/Section%206/CNMP_training_sutton_TN_N_M_190_1_a.pdf\]](http://www3.abe.iastate.edu/wastemgmt/Section%206/CNMP_training_sutton_TN_N_M_190_1_a.pdf)
- [77] H.B. MÖLLERA ET AL., *Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure*, Biomass and Bioenergy 26 (2004) 485 – 495
- [78] H. KIRCHMANN, E. WITTER, *Composition of Fresh, Aerobic and Anaerobic Farm Animal Dungs*, Bioresource Technology 40 (1992) 137-142
- [79] ANGELIDAKI I., SANDERS W. *Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants*, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 3: 117–129, 2004.
- [80] WELLINGER A. *Process design of agricultural digesters*, Nova Energie GmbH, 1999
[\[http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d14prdg.pdf\]](http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d14prdg.pdf)
- [81] I. BOHN ET AL., *Evaluation of methanogenesis at low temperatures: microbial ecology from a technological perspective*, 7th FAO/SCREEN-workshop, Moscow 2002, ed. S. Kalyuzhnyi, 1: 33-40
- [82] GAVALA H. ET AL. *Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process*, Biomethanation I, Springer Berlin / Heidelberg, 2004
- [83] SINGH L. ET AL., *PRODUCTION OF BIOGAS FROM NIGHT SOIL AT PSYCHROPHILIC TEMPERATURE*, Bioresource Technology 53,1995
- [84] KETTUNEN R. H., RINTALA J. A. *The effect of low temperature (5±29 °C) and adaptation on the methanogenic activity of biomass*, Appl Microbiol Biotechnol (1997) 48: 570±576
- [85] NOZHEVNIKOVA A. N. *Evidence for the Existence of Psychrophilic Methanogenic Communities in Anoxic Sediments of Deep Lakes*, APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, Mar. 2003
- [86] KOTSYURBENKO O.R. *Trophic interactions in the methanogenic microbial community of low-temperature terrestrial ecosystems*, FEMS Microbiology Ecology 53 (2005) 3–13
- [87] EDWARDS R. D., *Implications of changes in household stoves and fuel use in China*, Energy Policy 32 (2004) 395–411
- [88] FULFORD D. *Running a Biogas Programme: A Handbook*, ITDG publishing, 1988
- [89] MC KINSEY ZICARI S., *REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS USING COW-MANURE COMPOST*, Cornell University, 2003



- [90] GEORGIA TECH. RESEARCH INSTITUTE, *Handbook on biogas utilization*, U.S. Department of Energy, 1988
- [91] MANDAL T. ET AL. *Determination of the quality of biogas by FLame temperature measurement*, Energy Conversion & Management 40 (1999)
- [92] PERRY R. H. ET AL., *Perry's Chemical Engineers Handbook, Seventh edition*, McGraw Hill International, 1998
- [93] GROPELLI E., GIAMPAOLI O., *El camino de la biodigestión*, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 2001
- [94] COUTO H. S., *Domestic Range Burner Design Procedure*, The Seventh Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, 2004 [<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/lcp.inpe.br/ignes/2004/12.17.07.52/doc/domestic.pdf>]
- [95] YADVIKA ET AL. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review*, Bioresource Technology 95 (2004)
- [96] SHYAM M., *A biogas plant for the digestion of fresh undiluted cattle dung*, Boiling Point No. 47, 2001
- [97] YAPP J., CDM potential for the commercialization of integrated biogas system, Caleb Management Service, Bristol, UK

