



Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales

Coordinadores:

Universidad de Oviedo
Marañón Maison, Elena
Fernández Nava, Yolanda
Castrillón Peláez, Leonor

Versión nº 2

Fecha de publicación:

23-11-2009



Autores:

Ainia:

Andrés Pascual Vidal, Begoña Ruiz Fuertes

Giro:

Belén Fernandez, Jordi Palatsi, Xavier Flotats

Universidad de Barcelona:

Toufik Benandallah, Sergi Astals, Joan Mata

Universidad de Cádiz:

Carlos J. Álvarez Gallego, Luis A. Fernández Güelfo, José L. García Morales, Blanca Montero Cordón, Montserrat Pérez García, Luis I. Romero García, Diego Sales Márquez, Rosario Solera del Río.

Universidad de León:

Xiomar Gómez Barrios, M^a José Cuetos Revuelta

Universidad de Oviedo 1:

Elena Marañón Maison, Leonor Castrillón Pelaez, Yolanda Fernández-Nava

Universidad de Oviedo 2:

Herminio Llana Coalla, María Antonia Morís Morán

Universidad de Santiago:

Laura Otero Rodríguez, Juan A. Álvarez Rodríguez, Juan M. Lema Rodicio



INDICE

1	Introducción	5
2	Alcance	10
3	Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera.....	10
4	Co-digestión de residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas	12
4.1	Co-digestión de residuos ganaderos con residuos de naranja	15
4.2	Co-digestión de residuos ganaderos con residuos de remolacha.....	16
5	Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos.....	18
5.1	Co-digestión de residuo ganadero y maíz.....	22
6	Co-digestión de residuos ganaderos y residuos animales	25
6.1	Co-digestión con residuos ganaderos y residuos de matadero	29
6.2	Co-digestión con residuos ganaderos y residuos pesqueros.....	34
7	Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea.....	39
8	Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiesel	39
9	Co-digestión de residuos ganaderos y otros residuos orgánicos	42
10	Conclusiones	46
11	Referencias bibliográficas.....	50



LISTA DE ACRÓNIMOS

AF	Anaerobic Filter (Filtro anaerobio)
CSTR	(Continuous stirred-tank reactor) Reactor continuo de tanque agitado
EDARI	Estación Depuradora de Aguas Residuales Industriales
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
IRYDA	Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario
MGRT	(Minimum guaranteed retention time) Tiempo de residencia mínimo garantizado
PFR	(Plug Flow Reactor) Reactor de flujo pistón
RB	Residuo Biodegradable
SV	Sólidos Volátiles
ST	Sólidos Totales
tep	Toneladas equivalente de petróleo
UASB	(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) Reactor de lecho de lodos
VCO	Velocidad de Carga Orgánica



1 Introducción

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual gracias a la acción de varios grupos de bacterias, la materia orgánica se descompone, dando como resultado dos productos principales: biogás y digestato.

El biogás es un combustible formado básicamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Su elevado contenido en metano (entre el 60-65%) le proporciona una elevada capacidad calorífica lo que hace posible, tras ser depurado para eliminar vapor de agua y H_2S , su uso en calderas (si la producción es pequeña) y/o en motores de cogeneración (cuando la producción es más elevada). El uso del biogás en motores de co-generación permite obtener electricidad y calor. La electricidad, con la aprobación del Real Decreto 661/2007, puede entregarse a la red eléctrica, recibiendo una remuneración económica por parte de la compañía eléctrica. Por su parte, el calor generado en el motor puede ser empleado para diferentes usos (calefacción, agua caliente, secado, invernaderos, producción de frío, etc.). El digestato puede utilizarse como enmienda en el campo, ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de separación sólido líquido y posterior estabilización de la fracción sólida (mediante compostaje).

Si se realiza una purificación adecuada del biogás (hasta que su concentración en metano sea similar a la del gas natural - entre un 91 y un 95% en CH_4), éste también puede emplearse como combustible de vehículos, pilas de combustible o incorporarlo a la red de gas natural.

Los residuos ganaderos son, en la mayoría de países, los residuos orgánicos que se producen en mayor cantidad (en España se producen del orden de cincuenta y dos millones de toneladas de purines) y la digestión anaerobia es un proceso idóneo para llevar a cabo el tratamiento de estos residuos. Respecto a este proceso, el Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 indica que *“el empleo de tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos de la actividad agro-industrial deberá suponer en un futuro cercano una de las mayores áreas de expansión de esta actividad en nuestro país. El empleo del secado de este tipo de residuos, y en especial de los purines, a partir de la combustión de gas natural, es poco eficiente desde el punto de vista energético y económico, por lo que debería convertirse en una prioridad al conseguir que en un corto plazo se produzca un cambio hacia un mayor empleo de la digestión anaerobia en estas aplicaciones”*.

Sin embargo, la producción de metano que se obtiene en el proceso no es muy elevada: $11,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ residuo ($347 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ SV) con purín de porcino, $17,7 \text{ m}^3$

CH_4/t residuo ($196 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$) con purín de vacuno y $54,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ residuo ($272 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$) con gallinaza y (Flotats y Sarquella, 2008).

Para aumentar la producción de biogás es factible añadir otros residuos biodegradables a los residuos ganaderos, tales como residuos orgánicos agroindustriales (co-digestión). La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de co-sustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al sistema. Este efecto puede deberse a un aumento en la biomasa activa resultando en una mayor resistencia a fenómenos de inhibición. También las partes inorgánicas de algunos de estos co-sustratos, como es el caso de las arcillas y compuestos de hierro, han mostrado un efecto positivo frente a los procesos de inhibición por amonio o sulfhídrico (Angelidaki and Elleggard, 2003). Además, unifica la gestión de estos residuos al compartir instalaciones de tratamiento, reduciendo los costes de inversión y explotación. El esquema general de este proceso se muestra en la siguiente figura.

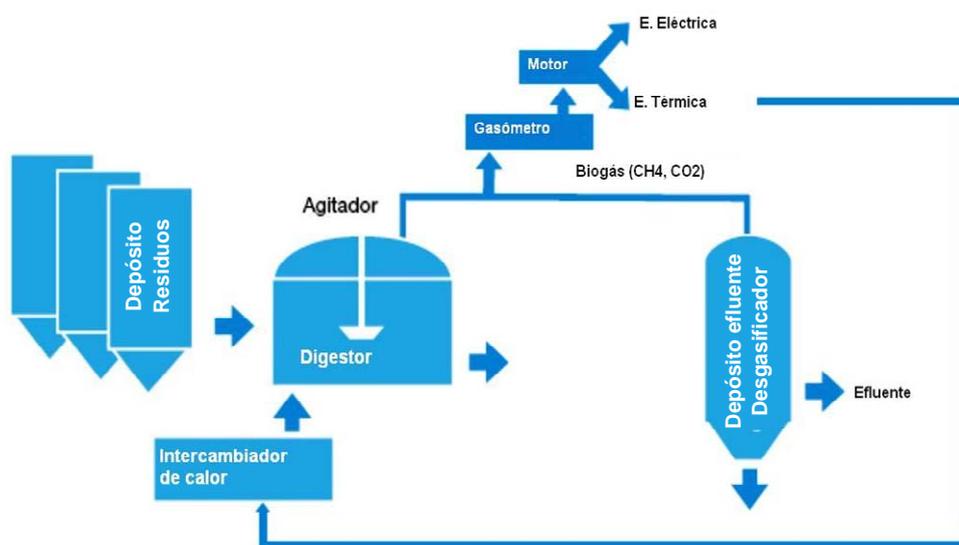


Figura 1. Esquema general del proceso de digestión anaerobia. FUENTE: GIRO



Dinamarca cuenta con una larga experiencia en la explotación de plantas de biometanización, pasando de 9 plantas centralizadas construidas en 1987 sólo para el tratamiento de residuos ganaderos, a 30 plantas en el año 2000, que utilizan un sistema de co-digestión de mezclas de diferentes tipos de residuos orgánicos, incluyendo lodos biológicos y FORSU, con una proporción mayoritaria de residuos ganaderos. La producción media de las plantas danesas que utilizan mezclas fue, para el mes de marzo de 2000, de 41,8 m³ de biogás/tonelada de residuo tratado, con un valor medio máximo en la planta de Vegger de 143 m³ gas/tonelada de residuos. Mediante datos de 1999, se comprobó que la producción en las plantas que trabajan únicamente con residuos ganaderos fue siempre inferior a 26,6 m³ de gas/tonelada, con un valor medio de 14,5 m³ de gas/tonelada.

La evaluación de la experiencia danesa se considera positiva, ya que contribuye al reciclaje de los residuos orgánicos, contribuye a la producción de energía renovable y a disminuir las emisiones de CO₂, ofrece una alternativa económica para muchos residuos de la industria alimentaria y lodos de pequeñas plantas depuradoras, contribuye a disminuir los costes de inversión en instalaciones de tratamiento colectivo, permite controlar la calidad de los productos que se aplican al suelo, y crea un marco de control y gestión en la zona de influencia de cada planta. Éstas pueden considerarse centros de gestión integral e integrada de residuos orgánicos.

Junto con Dinamarca existen otros países como Alemania, Austria y Suecia que se pueden considerar punteros en Europa en la obtención de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales.

En la última década, Suecia se ha convertido en el líder mundial en la utilización de biogás como energía renovable para aplicaciones de transporte. Según datos de 2004, aproximadamente 4500 vehículos funcionaban ya con combustible gas, incluyendo la mayoría de autobuses urbanos de sus principales ciudades. El 45% del gas de estos vehículos procede del biogás, mientras que el restante 55% procede del gas natural. Para el año 2020 se prevé que aproximadamente 200.000 vehículos estén operando con biogás.

Las claves para alcanzar estos objetivos son:

- Apoyo Gubernamental, a través de “programas municipales de biogás”.
- Alto nivel de cooperación entre industrias: agricultura, gestión de residuos, tecnología del biogás, distribuidores de gas, autoridades, productores de vehículos. Como ejemplo, Biogas Väst Program (Goteborg).
- Elevada inversión en tecnologías de limpieza del biogás (necesarias en aplicaciones de automoción).



- Facilidades en las redes de distribución. Posibilidad de inyección del biogás (previo tratamiento), en las redes de distribución de gas natural.

Las últimas implementaciones realizadas en Suecia, aparte de la mayor incorporación de co-substratos de reacción, están enfocadas en el aumento de los índices de producción mediante pretratamientos térmicos, aplicados sobretudo a subproductos animales o residuos ricos en lípidos.

A inicios de los años 80 se propició la instalación de plantas de biogás en el sector ganadero en España, a través de una línea de subvenciones y crediticia abierta por el IRYDA durante los años 1981 y 1982, pero con el tiempo la mayoría de plantas fueron quedando fuera de servicio, debido a algunas deficiencias y a un marco económico no favorable, llegando tan sólo una a los 20 años de operación en una granja de cerdos (Flotats y Gibert, 2002). En el año 1984 se realizó un plan de seguimiento de instalaciones (Rieradevall et al., 1985), detectándose múltiples deficiencias a diversos niveles para algunas plantas:

- Diseños deficientes y no adaptados a las condiciones del campo español, debido a la falta de conocimientos adecuados.
- Diversos problemas de mantenimiento y operación: personal no entrenado para las tareas de operación y control, operaciones de mantenimiento preventivo no realizados de forma periódica y reparaciones de equipos no realizadas a tiempo.

El aprovechamiento energético de los residuos ganaderos tiene un doble efecto positivo: reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y reducción de las emisiones equivalentes debidas a la fuente fósil que se sustituye. Este doble efecto sólo se consigue si se optimiza tanto la producción como el uso de la energía obtenida en forma de biogás. En la tabla 1 (Angelidaki y Ahring, 1997a) se recogen datos estimados sobre potenciales de producción de biogás de algunos de los residuos testados en las plantas de Dinamarca. Basándose en estos datos, un aprovechamiento del 50% podría aportar una contribución de 2,7 Mtep/año al balance energético nacional. Este es un valor elevado teniendo en cuenta que el tamaño de muchas granjas no permite una economía de escala, pero hace notar el interés de estudiar a fondo la viabilidad de la implantación y sobretudo si tratamientos colectivos y la co-digestión pueden propiciar escenarios favorables.



Tabla 1. Potenciales de producción de biogás de algunos residuos orgánicos de la industria alimentaria y de la fracción orgánica de residuos municipales

Tipo	Contenido orgánico	SV (%)	Producción biogás (m ³ /t residuo)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
Fangos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	13-18	90-130
BBO (tierras filtrantes de aceites, con bentonita)	80% lípidos, 20% otros orgánicos	40-45	350-450
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1.000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	15-20	85-110
FORSU separada en origen	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	20-30	150-240



2 Alcance

Este manual recoge información sobre el estado de conocimiento tecnológico (tipo de reactor, temperatura de operación, usos de biogás y digestato, etc.) de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y residuos agroindustriales. Los **residuos ganaderos** considerados son, principalmente, purín de cerdo y de vacuno. Respecto a los **residuos agroindustriales**, estos se han dividido en los siguientes grupos:

- Residuos de la industria aceitera: Alperujo
- Residuos de cultivos de huerta: Cortezas de naranja y residuos de remolacha
- Cultivos energéticos: Residuos de colza, residuos de girasol, residuos de maíz
- Residuos animales: Residuos pesqueros, residuos de animales procedentes de matadero
- Residuos de la industria láctea: Lodos lácteos
- Residuos de la fabricación de biodiesel: Glicerina

Los datos presentados en este manual se han seleccionado de la información obtenida en plantas de co-digestión anaerobia de este tipo de residuos y de información obtenida en artículos científicos. Las plantas están ubicadas en diferentes países de Europa (Alemania, Austria, Dinamarca, España, Finlandia, Holanda, Irlanda, Italia, Polonia, Reino Unido y Suecia), en Canadá, India y Túnez.

3 Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera

Uno de los principales residuos de la industria aceitera es el **alperujo**, generado en el proceso de obtención del aceite de oliva en las almazaras mediante el procedimiento de centrifugación en dos fases. Es una mezcla de alpechines (fase líquida), restos de aceituna (hueso, mesocarpo y piel) y restos grasos.

El alto contenido en materia orgánica (lípidos, principalmente) de estos residuos afecta negativamente al proceso de digestión anaerobia, haciéndolo inestable debido al bajo contenido en nitrógeno y a las altas concentraciones de compuestos aromáticos presentes (polifenoles), además de a la baja alcalinidad del residuo. Una solución a este problema es la co-digestión con otros residuos.

No se han encontrado experiencias a escala de laboratorio sobre co-digestión de alperujo, pero sí se ha utilizado alpechín en co-digestión anaerobia.



Experimentalmente se ha comprobado que la co-digestión de alpechín con purín de porcino es un método económicamente rentable al no ser necesario el aporte de nutrientes o la adición de reactivos químicos para mejorar la capacidad tampón del sistema (Angelidaki et al., 1997b). Sin embargo, es necesario conocer la cantidad óptima de purín para realizar la co-digestión de forma efectiva. Un modelo cinético desarrollado para el proceso de co-digestión de mezclas de alpechín y purín de cerdo establece que el proceso resulta estable cuando se tratan mezclas que contienen entre el 10-25% de purín (Angelidaki et al., 1997c).

Datos obtenidos en experimentos en discontinuo realizados a escala de laboratorio con mezclas de alpechín (63 g SV/L, 202 g DQO/L, 0,1 g N-NH₄/L y 5,5 g CaCO₃/L de alcalinidad) y purín de cerdo (38 g SV/L, 65 g DQO/L, 4,9 g N-NH₄/L y 28,2 g CaCO₃/L de alcalinidad) muestran que la velocidad de producción de metano fue mayor cuando se trataron mezclas de ambos residuos con relaciones DQO/N entre 61:1 y 42:1.

Estudios realizados por los mismos investigadores en un reactor UASB de 2L de capacidad, trabajando con una relación de recirculación de 1:4 y un tiempo de residencia hidráulico de 48 horas, muestran que es posible alcanzar altas producciones de biogás, con una composición del 65% en CH₄, además de alcanzar reducciones en el contenido en materia orgánica de la mezcla tratada entre el 65%-85% y una baja concentración de ácidos grasos volátiles en el efluente tratado. Estos resultados se alcanzan incluso con bajas diluciones del alpechín (relación residuo:purín en la mezcla tratada de hasta 1:2, que equivale a una velocidad de carga orgánica de 70 g DQO/L-día). Sin embargo, se observó que la degradación de compuestos orgánicos presentes en el residuo, como taninos y polifenoles, no fue completa, quedando concentraciones importantes de productos de la degradación, como el metilfenol o etilfenol. No se conoce la temperatura a la que se realizó la experimentación (Angelidaki et al., 2002).

Necesidades de I+D detectadas

Como conclusión a la información encontrada cabe destacar que el proceso de co-digestión de mezclas de residuo ganadero y alperujo se encuentra actualmente en fase experimental, no encontrándose datos sobre plantas industriales en operación que realicen la co-digestión de este tipo de mezclas. En base a la información obtenida se ha detectado la necesidad de una mayor profundización en aspectos como los siguientes:

- Estudio de posibles pretratamientos que mejoren la biodegradabilidad de compuestos orgánicos presentes en el residuo, para aumentar así los rendimientos de producción de biogás y, en concreto, de metano.



- Condiciones óptimas para el tratamiento: Temperatura, relación DQO/N en la mezcla de residuos, velocidad de carga orgánica, carga de sólidos de la mezcla alimentada, tiempo de residencia hidráulico.
- Tipo de reactor más adecuado para la co-digestión.
- Composición del biogás obtenido, principalmente en cuanto a la presencia de impurezas que deban eliminarse según la aplicación del mismo (motores de co-generación, pilas...)
- Datos obtenidos en ensayos a escala piloto, que reproduzcan las condiciones óptimas de operación alcanzadas en el laboratorio.
- Composición y posibilidad de utilización del digestato obtenido (condicionado por la presencia de compuestos de difícil degradación derivados de la presencia en el residuo de taninos y polifenoles).

4 Co-digestión de residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas

Los restos de frutas y vegetales se generan en grandes cantidades tanto en mercados como en industrias transformadoras, como por ejemplo, la industria de los zumos. La composición de estos residuos (altas concentraciones de grasa/aceites, azúcar o proteínas) hace que tengan un alto potencial para producir metano, pero debe ser usados con cuidado, alimentándolos al proceso a un ritmo controlado. En la tabla 2 se recoge el potencial de producción de metano de diferentes frutas y vegetales, obtenidos mediante ensayos BMP - Biochemical Methane Potential - (Nallathambi Gunaseelan, 2004).



Tabla 2. Producción de metano en residuos de frutas y vegetales (rango mesofílico, 35°C)

Residuo	SV (% de ST)	Producción de metano (m ³ /t SV alimentado)
Mango	95,7	469
Plátano	91,2	292
Naranja	93,5	479
Mandarina	94,6	471
Limón	96,8	473
Piña	93,9	356
Uva	91,1	232
Tomate	95,3	298
Cebolla	88,2	400
Patata	90,9	267
Berenjena	92,6	385
Coliflor	84,6	261
Nabo	84,4	314
Rábano	83,3	299

Se han realizado estudios a escala de laboratorio sobre el proceso de co-digestión de purín de cerdo (DQO= 16,40 g/L, ST= 14,72 g/L) y residuos de fruta (sobre todo de pera y manzana; DQO= 179,28 g/L; ST= 152,7 g/L). El estudio se realizó a escala de laboratorio en reactores de mezcla completa de 11 L, en rango mesofílico (37°C) y con un tiempo de residencia hidráulico de 16 horas (Ferreira et al., 2007). Los resultados muestran que las producciones más elevadas de biogás se alcanzaron cuando se emplearon mezclas con un contenido en residuos de frutas entre el 10 y el 15% (v/v), lo que corresponde a una VCO de 1,50 y 2,95 kg SV/m³·día. Cuando el contenido en residuo de fruta de la mezcla fue del 10%, la producción de biogás resultó menor (12,11 m³/m³ de mezcla) pero el contenido en metano del mismo fue muy alto (69%). Con mezclas con un 15% de residuo de fruta, la producción de biogás aumentó (22,79 m³/m³ de mezcla) pero el contenido en metano resultó más bajo (58%).



Existen algunas plantas que operan a escala industrial en las que se co-digieren residuos ganaderos con restos de residuos vegetales y frutas, siendo los restos de patatas los residuos agroindustriales que más se utilizan. En la tabla 3 se reúne la información obtenida sobre dichas plantas.

Tabla 3. Plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas

Planta	Descripción
Miralcamp (Lérida-España)	<p>Purín de cerdo</p> <p>Co-sustratos: aceite de soja, fangos depuradoras agroindustriales, residuos de mermeladas y residuos de patata</p> <p>Reactor CSTR de 1360 m³</p> <p>50 t mezcla/día (3,5% m.s.), TRH de 30 días, 35°C</p> <p>40 m³ biogás /t mezcla, >65% de CH₄</p>
Vila-Sana (Lérida-España)	<p>Purín de cerdo (80%)</p> <p>Co-sustratos (20%): Residuos orgánicos de la zona como derivados de alcohol, derivados de aceites vegetales, lodos de depuradora de aguas industriales, derivados de frutas, cebolla y leche</p> <p>2 digestores de 1270 m³</p> <p>30,7 t mezcla/día; TRH de 15 días, 52-55°C</p> <p>71,4 m³ biogás /t mezcla</p>
Cudwoth Pork (Canadá)	<p>Purín</p> <p>Co-sustrato: patatas</p> <p>Reactor de 2000 m³</p>
Granja Kotimäki (Halsua-Finlandia)	<p>Purín de cerdo</p> <p>Co-sustrato: lodo seco, pieles de patatas y residuos biodegradables procedentes de la industria de la madera</p> <p>Reactor de 250 m³; 55°C</p>



4.1 Co-digestión de residuos ganaderos con residuos de naranja

La utilización de residuos cítricos en la co-digestión anaerobia podría contribuir a solucionar el problema de gestión de estos residuos en las zonas de elevada producción (principalmente el Levante español). Sin embargo, la presencia de aceites esenciales en la corteza (mayoritariamente en el flavedo) dificulta el proceso por su efecto inhibitor. Estudios anteriores a escala de laboratorio (Lane, 1984) muestran que el efecto inhibitor depende de la concentración de aceites esenciales, ya que se reduce este efecto cuando la concentración en el digester baja de 0,075 g/L. La concentración de aceites esenciales puede reducirse aplicando pretratamientos al residuo de naranja. Lane estudió a escala de laboratorio su destilación y eliminación mecánica.

Existen datos sobre co-digestión anaerobia de estiércol de vacuno y restos del procesado de la naranja obtenidos en un estudio realizado a escala piloto en 1995 en India (Srilata et al., 1995), en el que se estudiaba el efecto del pretratamiento con diferentes hongos sobre la producción de biogás. La experiencia se realizó en un reactor de mezcla completa de 1500 L (propiedad de Khadi and Village Industries Commission), inicialmente cargado con estiércol de vacuno, siendo progresivamente reemplazado por residuos del procesado de naranja. Se trabajó en rango mesofílico (30°C) y con un TRH de 25 días. Los hongos empleados fueron: *Sporotrichum*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*. Se observó que el pretratamiento realizado aumentó la biodegradabilidad de los compuestos poliméricos presentes y, de esta manera, el contenido en azúcares y proteínas. Una alimentación de residuos del procesado de naranja con un 8% (peso seco) de residuo pretratado, aumentó los niveles de producción de biogás, alcanzándose una producción de 500-600 m³ biogás/t SV (equivalente a 450 - 540 m³ biogás/t residuo de naranja).

Necesidades de I+D detectadas

Respecto al proceso de co-digestión de mezclas de residuo ganadero y residuos de naranja y en base a la información obtenida se ha detectado la necesidad de una mayor profundización en aspectos como los siguientes:

- El pretratamiento con hongos del residuo de naranja mejora la producción de biogás, pero sería interesante probar otros pretratamientos (térmicos, mecánicos...).
- Optimización del proceso en cuanto a producción de biogás y contenido en metano: Influencia de la temperatura, relación DQO/N en la mezcla de residuos, velocidad de carga orgánica, carga de sólidos de la mezcla alimentada, tiempo de residencia hidráulico.



- Tipo de reactor más adecuado para la co-digestión.
- Composición del digestato obtenido (con vistas a su posterior utilización como fertilizante).

4.2 Co-digestión de residuos ganaderos con residuos de remolacha

Existen estudios a escala de laboratorio que muestran que la co-digestión de restos de remolacha (hojas y raíces) con purín de vacuno incrementa en 1,49 veces la producción de metano con respecto a la obtenida cuando sólo se trata purín. Los estudios se realizaron en rango termofílico (55°C), en digestores discontinuos y con un TRH de 20 días. Esta producción es máxima cuando se emplea un 40% de restos de remolacha (en concreto, las hojas). Sin embargo, un exceso de remolacha puede producir la inhibición del proceso de digestión anaerobia, sobre todo si se trata de raíces, pues presentan un contenido mayor en azúcares (en torno al 18% en base húmeda). Por otro lado, la adición de este tipo de materia orgánica al estiércol vacuno en los procesos de co-digestión aumenta el valor fertilizante de los efluentes (Umetsu et al., 2006).

Además, en Italia (en la región de Emilia Romagna) comenzó a operar en el verano de 2005 una planta de co-digestión de purín de vacuno y restos de cebollas, patatas, remolacha, maíz y forraje. En esta planta, el biogás obtenido se quema en motores de co-generación tras ser previamente depurado mediante un sistema de desulfuración biológico con adición de aire para reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno. De la energía eléctrica generada, una parte se usa en la granja ganadera y en la propia planta y el resto se vende a la red eléctrica. Las características de la planta se muestran a continuación (Soldano et al., 2007).



Tabla 4. Datos técnicos de una planta industrial de co-digestión de purín de vacuno y remolacha

Planta de Biogás en Emilia Romagna (Italia)	
Gestor	Seguimiento realizado por CRPA (Centro Ricerche Produzioni Animali s.p.a.)
Co-sustratos	Purín de vacuno (62%, 1 ^{er} periodo; 40%, 2 ^o periodo) Residuo agroindustrial: Cebollas, Remolacha, Patatas, maíz. (38%, 1 ^{er} periodo; 60%, 2 ^o periodo)
Dimensiones del digestor	2 digestores de 1200 m ³ cada uno
Capacidad de tratamiento	18,5 t/día (1er periodo); 28,5 t/día (2 ^o periodo)
Temperatura de operación	38°C
Materia seca	ST (g/kg): Purín (89,2), Cebollas (101,6), Remolacha (150,4), Patatas (222,8), maíz (310,5)
Tiempo de residencia	Dato no especificado
Producción de biogás	75 m ³ /t mezcla residuos (1 ^{er} período) 100,7 m ³ /t mezcla residuos (2 ^o período)
Contenido en CH ₄ del biogás	55% (1 ^{er} periodo) 53% (2 ^o periodo)

Necesidades de I+D detectadas

En base a la información obtenida sobre el proceso de co-digestión de mezclas de residuo ganadero y restos remolacha se ha detectado la necesidad de una mayor profundización en aspectos como los siguientes:

- Posibilidad de que el pretratamiento del residuo aumente la producción y contenido en metano del biogás obtenido.
- Optimización del proceso en cuanto a producción de biogás y contenido en metano: Influencia de la temperatura, relación DQO/N en la mezcla de residuos, velocidad de carga orgánica, carga de sólidos de la mezcla alimentada, tiempo de residencia hidráulico.
- Tipo de reactor más adecuado para la co-digestión.



- Composición del digestato obtenido (con vistas a su posterior utilización como fertilizante).

5 Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos

Los cultivos energéticos presentan propiedades que los hacen muy buenos sustratos en la obtención de biogás mediante digestión anaerobia, hasta el punto de que existen plantas industriales que realizan la digestión anaerobia solamente con estos cultivos. La cantidad de biogás generado de un sustrato en particular depende fuertemente de la composición del sustrato. Una composición típica de un cultivo energético es: 60-70% de carbohidratos, 10-12% de proteínas, 2-3% de grasas y 10-15% de agua. En la tabla 5 se recogen valores de producción de biogás de los diferentes constituyentes de los cultivos energéticos (Rutledge, 2004), según datos de Tekniska Verken, empresa constructora de una de las mayores plantas de tratamiento anaeróbico de cultivos energéticos (ubicada en Linköping, Suecia).

Tabla 5. *Biogás producido durante la completa degradación de 1 kg de sustrato (Tekniska Verken)*

Componente	Producción de biogás (m ³ N/t)	Contenido en CH ₄ (%)
Grasas	1.390	69
Proteínas	650	78
Carbohidratos	850	50

Estimaciones realizadas sobre la capacidad de algunos cultivos para producir electricidad, muestran que 1 ha de maíz (alrededor de 50 t) puede producir entre 2-2,5 kW eléctricos, 1 ha de pasto (alrededor de 25 t) entre 0,8 – 1,2 kW eléctricos, mientras que 1 vaca (alrededor de 18,25 t/año) genera alrededor de 0,2 kW eléctricos (DeBruyn, 2006).

A partir de la información recogida sobre el proceso de co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y cultivos energéticos se observa que existe gran experiencia en este campo, existiendo un gran número de plantas operando a escala industrial y ubicadas en su mayoría en Alemania, Holanda, Dinamarca, Austria, Suecia y Finlandia. En la tabla 6 se recogen datos técnicos de plantas que operan a escala industrial y utilizan como sustratos para la digestión anaerobia, residuos ganaderos



y cultivos energéticos. En estas plantas el biogás se quema en motores de co-generación obteniendo electricidad y calor, mientras que la fracción líquida del digestato se emplea como fertilizante.

Las plantas recogidas en la tabla operan en rango mesofílico, con reactores agitados y con tiempos hidráulicos de residencia que van desde los 22 a los 77 días. La proporción residuo ganadero/cultivo energético es variable, la producción de biogás y la concentración de metano en el biogás obtenido se mantiene en valores entre 50-75%. Se han alcanzado producciones de 200 m³ de biogás/t mezcla alimentada operando con reactores en dos fases, en rango mesofílico el primero y termofílico el segundo, con TRH entre 15-20 días en cada uno de los reactores y empleando proporciones purín:cultivo energético de 1:7 (planta de Archea, Suedhorsten - Alemania).



Tabla 6. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y cultivos energéticos.

	Jühnde Bio-Energy Village (Alemania)	Rohkraft (Baja Austria)	Archea (Alemania)	Leeuwarden (Holanda)	Järna (Suecia)	Jyväskylä (Finlandia)
Co-sustratos	Vacuno (51%) Silo hierba y maíz (42%) Maíz grano (7%)	Purín de cerdo (30%) con lixiviados de los silos cultivos C. energéticos y res. Vegetales (70%)	Purín cerdo (12,5%) Hierba fresca (12,5%) Silo (75%)	Vacuno, gallinaza C. energéticos (<20%) Hierba	Vacuno (40%) Paja (8%) Avena (52%)	Vacuno Residuo cosechero
Digestor	1º: 3.000 m ³ 2º: 5.000 m ³	1º CSTR 2.000 m ³ 2º CSTR 1.850 m ³	1º: 270 m ³ Higienización 2º: 340 m ³	80 m ³	R. Hidrol.: 53 m ³ R. Met.: 17,6 m ³	150 m ³
Capacidad de tratamiento	55-60 t/día	50 t/día	10 t/día	2,5 m ³ /día	404 kg/día	
Tª de operación	38°C	39°C	1º: 37-38°C Higienización 2º: 50-53°C	37-40°C	38°C	35-37°C
Materia seca	26%	33,7% (en SV)	12%			
Tiempo residencia	66 días	77 días	1º: 15-20 días 2º: 15-20 días	28 días	22 días	22 días
Producción biogás	7.200-8.400 m ³ /día (131-140 m ³ /t)	11.008 m ³ /día (220 m ³ /t)	> 2.000 m ³ /día (>200 m ³ /t)		0,17 m ³ CH ₄ /kg SV	0,21 m ³ CH ₄ /kg SV
Contenido en CH ₄ del biogás	50%	Dato no disponible	52-56%	65-75%		55-58%
Contenido en SH ₂	100-200 ppm		< 100 ppm tras desulfurización con aire y madera			
Producción energética	Elect: 680 kW Calor: 700 kW	Elect: 8.030 MWh/año Calor: 8.223 MWh/año	Electricidad: 240 kW Calor: desconocido	30 kW	Calor	



En la tabla 7 se recoge un listado de plantas que obtiene biogás por co-digestión anaerobia de residuos ganaderos, cultivos energéticos y otros residuos agrícolas.

Tabla 7. Plantas de co-digestión anaerobia de residuo ganadero y cultivos energéticos

Planta	Ubicación	Constructor (Año)	Alimentación
Menz	Alemania	Krieg & Fischer (2004/05)	Purín (Cerdo y vacuno), maíz y trigo
Wiesenau Dairy Farmo	Alemania	Krieg & Fischer (2007)	Purín y estiércol vacuno, trigo y maíz de ensilaje
Jühnde Bio-Energy Village	Alemania	Krieg & Fischer Haase Anlagenbau AG	Purín (vacas y cerdos), maíz de ensilado y en grano, hierba de ensilado
Kornmayer	Alemania	Krieg & Fischer (2004/05)	Purín (vacas y cerdos), maíz y hierba
Beesten	Alemania	Lipp GMBH Industriestrasse	Purín (vacuno y cerdo) y maíz
Weiss II	Alemania	Krieg & Fischer (2006/07)	Purín de cerdo, estiércol de vacuno, maíz y hierba
Uelzen	Alemania	Krieg & Fischer (2001/02)	Purín de cerdo, maíz, cebollas, patatas y residuos agrícolas
Fabel	Alemania	Krieg & Fischer (2001)	Purín de cerdo, maíz, residuo de almidón de patata, residuos agrícolas
Van Gennip	Alemania	Krieg & Fischer	Purín de cerdo, estiércol de pavo, maíz de ensilaje, grasas
Buchmann	Alemania	Krieg & Fischer (2005)	Purín de cerdo, maíz, hierba y trigo de ensilaje
Baden-Wütemberg	Alemania	Krieg & Fischer	Purín (cerdo y vacuno), maíz, hierba y estiércol
Riedlingen	Alemania	Krieg & Fischer (2007)	Purín de vacuno, maíz de ensilaje, hierba de ensilaje, cultivo de ensilaje
Wangen	Alemania	Krieg & Fischer (2006)	Purín de vacuno, maíz y hierba de ensilaje
Porter Dairy Farm	Holanda	PlanET Biogastechnik GmbH	Purín (vacuno y cerdo), maíz de ensilaje, trigo, hierba
Hofgut Holland Farm	Alemania	Krieg & Fischer (2004)	Estiércol de cerdo y de pavo, cultivos energéticos



Tabla 7. Plantas de co-digestión anaerobia de residuo ganadero y cultivos energéticos (Continuación)

Planta	Ubicación	Constructor (Año)	Alimentación
Grima + Schöndienst	Alemania	Krieg & Fischer (2004/05)	Purín de cerdo, cultivos energéticos, estiércol
Todendorf	Alemania	Krieg & Fischer (2002)	Purín y hierba de ensilaje
Thiessen	Alemania	Krieg & Fischer (2000)	Purín y cultivos energéticos
Suedhorsten	Alemania		Estiércol de porcino, centeno y cereal
Agrokomplex kolinany	Eslovaquia	Krieg & Fischer (1996-1999)	Purín y paja
Rohkraft	Austria	AAT Biogas Rohkraft	Purín de porcino, cultivos, lixiviado de cultivos ensilado
Jyväskylä*	Finlandia		Purín de vacuno, residuo de cosecha (tréboles, pasto, heno y avena)
Järna*	Suecia		Purín de vacuno, residuo orgánico de la granja (paja, cáscara de avena)
Nij Bosma Zathe Applied Research Station	Holanda		Purín (cerdo, vacuno y pollos), hierba y sorgo
Prato allo Stelvio	Italia	Krieg & Fischer (2003)	Purín, paja y otros residuos orgánicos

* Plantas Piloto

5.1 Co-digestión de residuo ganadero y maíz

Respecto al proceso de co-digestión de residuos ganaderos y maíz, existe también un número elevado de plantas que operan a escala industrial. En la tabla 8 se recogen datos técnicos de algunas plantas que co-digieren residuos ganaderos y maíz. Las plantas operan en rango mesofílico, con reactores agitados y con tiempos hidráulicos de residencia entre 12 horas y 40 días.



La proporción residuo ganadero/cultivo energético es variable, así como la producción de biogás, aunque la concentración de metano en el biogás obtenido se mantiene en valores entre 51-55%.

Se han alcanzado producciones de hasta 222 m³ de biogás/t mezcla alimentada (44% de residuo ganadero y 56% de silo de maíz) con un contenido en metano del 54% (Planta de Eissen, Holanda), aunque se desconocen datos sobre el tiempo de residencia y la temperatura de operación.

En todas estas plantas el biogás obtenido se quema en motores de co-generación obteniendo electricidad y calor. La fracción líquida del digestato se emplea como fertilizante en la mayoría de las plantas.



Tabla 8. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y maíz.

	Kaarssen (Alemania)	Beesten (Alemania)	Löningen (Alemania)	“Spargelhof Querdel” (Alemania)	Eissen (Holanda)
Constructor/Gestor	Bioconstruct GMBH	Lipp GmbH	Schmack Biogas AG	Bio Energy Biogas GMBH	PlanET Biogastechnik GmbH
Co-sustratos	Vacuno (77%) Silo de maíz (23%)	Ganaderos (50%): 75% cerdo y 25%vacuno Silo de maíz (50%)	Ganaderos (77%): cerdo+otros Silo de maíz (23%)	Purín de pavo (20- 50%) Silo de maíz	Ganadero (44%: 50% cerdo y 50% vacuno) Silo de maíz (56%)
Digestor	1º: 2x5.500 m ³ 2º: 1x2.500 m ³ y 1x5.200 m ³	Pre-reactor: 1.200 m ³ Reactor: 1.300 m ³	2 horizontales EUCO® 400 m ³ 5 verticales COCCUS® 1.800 m ³	Reactor horizontal de flujo pistón de 700 m ³	3 reactores de 500 m ³
Capacidad de tratamiento	450 m ³ /día	68 t/día	120 t/día	12-13 t/día	90 t/día
Tª de operación	40°C (mesofílico)	40°C (mesofílico)	38-42°C (mesofílico)	39°C (mesofílico)	Dato no disponible
Materia seca	9-10%	29% (final: 7-8%)	5-8%	A la salida: 8%	28%
Tiempo residencia	1º: 22 días 2º: 8 días	20-30 días	12 horas	30-40 días	Dato no disponible
Producción biogás	28.000 m ³ /día (62,2 m ³ /m ³)	1.680 m ³ /día (24,7 m ³ /t)	10.000 m ³ /día (83,3 m ³ /t)	Dato no disponible	~ 20.000 m ³ /día (222 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	51-52%	52%	52-55%	52%	54%
Contenido en SH ₂	De 2.000 ppm a <150 ppm	< 200 pm (tras tratamiento con FeCl ₂)	< 200 ppm	200 ppm	
Producción energética	2.800 kW	440kW	800 kW	310 kW	1.250 kW



En la tabla 9 se recoge un listado de plantas que co-digieren residuos ganaderos con maíz. Se observa que la mayoría de ellas se encuentran ubicadas en Alemania.

Tabla 9. Otras plantas de co-digestión anaerobia de residuo ganadero y maíz

Planta	Ubicación	Constructor (Año)	Alimentación
Milchhof Weinheim Biogas Plant	Alemania	Krieg & Fischer (2002)	Purín (sin especificar) y maíz
Midlum Biogas Plant	Alemania	Clarke energy Ltd Haase Energietechnik AG (2005/2006)	Residuo ganadero (Vacuno, cerdo, aves, pavos) y maíz (ensilado y en grano)
Futterkamp Research Station	Alemania	EnviTec Biogas GMBH (2005)	Purín de vacuno y maíz de ensilaje
Agrarenergie Kaarßen GMBH and Co. KG	Alemania	BioConstruct GmbH	Purín de vacuno y maíz de ensilaje
Planta centralizada de Löningen	Alemania	Bio-Energie Hasetal GmbH	Purín (cerdo, pollo, pavo) y maíz de ensilaje
Böckermann II	Alemania	Krieg & Fischer (2005/06)	Purín de cerdo y maíz de ensilaje
Leuter	Alemania	Krieg & Fischer (2004/05)	Purín y estiércol de cerdo y maíz de ensilaje y en grano
Thode	Alemania	Krieg & Fischer (2001)	Purín y maíz de ensilaje

6 Co-digestión de residuos ganaderos y residuos animales

Los subproductos animales y los residuos de matadero presentan propiedades que los hacen aptos para ser usados como co-sustratos en la co-digestión anaerobia con residuos ganaderos (alto contenido graso).

La Unión Europea exige la pasteurización o la esterilización de los residuos procedentes de matadero cuando estos vayan a ser utilizados en tierras agrícolas.



Según estudios realizados en ensayos en discontinuo por el *Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering (JTI)*, la digestión de subproductos animales previamente pasteurizados aumenta el rendimiento en la producción de metano cuatro veces con respecto al empleo de materiales no pasteurizados (Rutledge, 2004). Ello se debe a que, tras el tratamiento térmico los lípidos quedan más accesibles para la digestión anaerobia (tabla 10).

Por otra parte, el potencial de producción de metano es mayor para los restos de matadero de ganado bovino que para los de cerdo, en concreto unas nueve veces mayor.

Tabla 10. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de diferentes subproductos animales (ensayos en discontinuo)

Residuo	Producción de CH ₄ (m ³ /t)
Subproductos animales pasteurizados	225
Subproductos animales no pasteurizados	56
Mezclas de residuos de matadero	160
Residuos domésticos	130
Purines*	13

*Purines con contenido en SV del orden de 60-80 kg SV/t purín

Respecto a la existencia de plantas industriales que obtienen biogás a partir de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y subproductos animales, Dinamarca aparece como el país que cuenta con un mayor número de plantas, con la particularidad de que en ellas se co-digieren residuos ganaderos y mezclas de residuos animales procedentes de mataderos y de la industria del procesado de pescado. Suecia, Alemania, Polonia y España cuentan también con plantas en operación en los que el proceso de co-digestión anaerobia se realiza con este tipo de residuos. En España existe una planta ubicada en Juneda (Lérida). En la tabla 11 se recogen los datos técnicos de algunas de estas plantas.



Tabla 11. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de animales

	Hodsager (Dinamarca)	Vegger (Dinamarca)	Ribe (Dinamarca)	Lintrup (Dinamarca)
Constructor/Gestor	Hodsager Energiselskab A.m.b.a.		Construida por Krüger Ltd	LinkoGas A.m.b.a.,
Co-sustratos	Ganaderos (87,5%: 83% vacuno, 17% cerdo) Otros (12,5%): Residuos de matadero de cerdos, residuos grasos de las industrias de procesamiento de pescado, etc.	Ganaderos (71% vacuno) Residuo de mataderos de cerdos, arcillas usadas en el blanqueo del aceite, industria farmacéutica, industria alimentaria, lodos de depuradora, etc. (29%)	Ganaderos (84%: 75% vacuno, resto: cerdo, avícola, visón) Otros (16%): residuos de matadero, restos comida, procesamiento de pescado, medicamentos.	Ganadero (75%: 53% vacuno, 47% cerdo) Otros (25%): Residuos orgánicos de la industria de procesamiento de alimentos y de pescado, industria médica, residuos de matadero, etc.
Digestor	2 reactores verticales de 440 m ³	4 reactores de 230 m ³ (CSTR)	3 reactores verticales agitados de 1.745 m ³	3 digestores de 2.400 m ³ (CSTR)
Pretratamiento	No se realiza	Proceso a 55°C durante 3 h	MGRT 4 horas a 53°C	Pasteurización durante 10 horas a 53°C (T ^a de la digestión)
Capacidad de tratamiento	48 t/día	59 t/día	400-450 t/día	547 t /día
T ^a de operación	37°C	55°C	53°C	53°C Post-digestión a 42°C
Tiempo residencia	Dato no disponible	Dato no disponible	16-18 días	Dato no disponible
Producción biogás	1.918 m ³ /día (40 m ³ /t)	5.753 m ³ /día (97,5 m ³ /t)	13.150 m ³ /día (31 m ³ /t)	15.616 m ³ /día (28,5 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible	> 65%	Dato no disponible	> 65%
Producción energética	640 kW	2.830 kW	Dato no disponible	2.037 kW eléctricos 2.600 kW térmicos



Tabla 11. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de animales (Cont.)

	Hasjøj (Dinamarca)	Thorsø (Dinamarca)	Filskov (Dinamarca)	Blåhøj (Dinamarca)
Constructor/Gestor	Hashøj Biogas A.m.b.a,	Thorsø Miljø- og Biogasanlæg A.m.b.a.	Filskov Energiselskab A.m.b.a	Blåhøj Energiselskab A.m.b.a.
Co-sustratos	Ganaderos (72,5%: vacuno y cerdo) Otros (27,5%): Residuos de mataderos de cerdos, residuos de la industria alimentaria y del pescado	Ganaderos (88%: 40% vacuno, 60% cerdo) Otros (12%): Residuos de matadero, residuos grasos de industrias alimentarias y de pescado y lodos de depuradoras	Ganaderos (77%: 95% vacuno y 5% cerdo) Otros (23%): Residuos de matadero y residuos grasos de la industria de procesamiento de pollo y pescado	Ganaderos (88,5%: 91% vacuno, 9% cerdo) Otros (18,5%): Residuos de mataderos, lodos de industrias de procesamiento de alimentos y pescado
Digestor	Digestor de 3000 m ³ (CSTR)	2 digestores de 2.325 m ³ (CSTR/PFR)	2 digestores de 440 m ³	2 digestores de 660 m ³
Pretratamiento	Pasteurización previa a la digestión (70°C durante 1 hora)	Pasteurización durante 1 h a 70°C del lodo de depuradora	4 h a la temperatura de operación	5 h a la temperatura de operación
Capacidad de tratamiento	138 t/día	261 t/día	79 t/día	87 t/día
Tª de operación	37°C	53°C	53°C	53°C
Materia seca	Dato no disponible	< 6%	Dato no disponible	Dato no disponible
Tiempo residencia	Dato no disponible	Dato no disponible	10 días en los digestores 35 días (post-digestión)	Dato no disponible
Producción biogás	8.220 m ³ /día (59,6 m ³ /t)	7.123 m ³ /día (27,3 m ³ /t)	3.562 m ³ /día (45 m ³ /t)	3.836 m ³ /día (44 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible	> 65%	> 65%	> 65%
Producción energética	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible



6.1 Co-digestión con residuos ganaderos y residuos de matadero

Son numerosas las investigaciones realizadas sobre digestión anaerobia de residuos animales generados en mataderos, aunque usados como único sustrato en el proceso. Sin embargo, no se encontraron experiencias a escala laboratorio o piloto de co-digestión de residuos ganaderos y residuos de matadero, si bien sí existen plantas que operan a escala industrial y que obtienen biogás a partir de la co-digestión de este tipo de mezclas.

Respecto a la higienización exigida en la UE para los residuos de matadero, Edström et al. (2003) estudiaron el efecto de este pretratamiento en una mezcla de residuos animales procedentes de mataderos (harinas de carne, rúmen, estómagos y contenido estomacal) y residuos alimentarios. Se observa que con este pretratamiento la producción de biogás es 4 veces mayor cuando se higieniza la mezcla a tratar ($1140 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{SV}}$ frente a $310 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{SV}}$ obtenido con mezcla sin higienizar). Los mejores resultados se obtuvieron con mezclas con contenidos del 8% de harinas cárnicas (reactor CSTR convencional con un tiempo de retención hidráulica de 22-39 días y VCO $2.5\text{-}5 \text{ kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$). Estos investigadores realizaron también experiencias a escala piloto, con mezclas con contenido del 15% de harinas cárnicas. En esta experiencia se sustituyó el residuo alimentario por estiércol. Con una velocidad de carga orgánica máxima de $3,2\text{-}5 \text{ kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y tiempo de residencia de 22 días, se alcanza una producción de biogás de $700 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{SV}}$.

Wang et al. (2003) trabajaron en un rango mesofílico con sangre de vacuno y contenido estomacal en una proporción 1:3. El objetivo de este trabajo fue investigar los problemas de sobrecarga causados por la acumulación de ácidos grasos volátiles y amonio en un reactor de mezcla completa. Se compararon 2 tipos de tratamiento, un CSTR convencional (tiempo de retención hidráulico y tiempo de retención de sólidos de 10 días) y otro de dos fases compuesto por un “hydraulic flush” (HFR), con un tiempo de retención significativamente más corto que el tiempo de retención de sólidos, y un filtro anaerobio (AF). Esta estrategia de operación se diseñó para retener los componentes fibrosos del material.

El CSTR falló a cargas de sólidos de $5 \text{ kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y sólo mostró un máximo de un 41% de reducción de sólidos, mientras que con el HFR la reducción de sólidos aumentó al 66%, funcionando satisfactoriamente hasta $7 \text{ kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$. El AF, con un tiempo de residencia de 1 día y carga orgánica en el rango de $4,0\text{-}13,1 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, alcanzó una eliminación de la DQO del 95% y una producción de metano de hasta $0,34 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{DQO}} \text{ eliminada}$. Globalmente, en el sistema de dos fases se obtuvo una degradación de 66% ST y del 81,7% DQO, así como una producción de metano de $0,21 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{ST}}$, con una carga orgánica de $7 \text{ kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$.



Cuetos et al. (2007) realizaron experimentos en rango mesofílico (34°C) y con un CSTR, co-digiriendo residuos de matadero y la fracción orgánica de residuos municipales (FORSU). La segunda puesta en marcha se inició con un tiempo de residencia hidráulico de 50 días, una velocidad de carga orgánica de $0,9\text{ kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ para la digestión y $1,85\text{ kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ para la co-digestión. Bajo estas condiciones, una vez que el lodo se ha aclimatado a un medio con elevado contenido en amonio y grasas, fue posible disminuir el tiempo de residencia hidráulico mientras progresivamente se aumentaba la carga orgánica, hasta valores de 25 días y $1,7 - 3,70\text{ kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$. La eliminación de grasas alcanzó valores de hasta el 83%.

Resch et al. (2006) co-digirieron residuos urbanos, de mataderos e industrias de procesamiento de carne. El objetivo principal era evaluar la viabilidad de la co-digestión de la fracción líquida de la FORSU (en concreto, restos de pollo y de la industria del procesado de comida) con aguas de lavado de matadero y desechos de industrias de procesado cárnico. Una parte del trabajo de investigación se centró en el comportamiento del proceso de degradación bajo elevadas cargas de nitrógeno, recomendando prestar atención al contenido de proteína y grasa para evitar inhibiciones, así como separar directamente el nitrógeno (stripping), para así aumentar la estabilidad y productividad del proceso de digestión anaerobia.

Rosenwinkel et al. (1999) estudiaron el proceso de co-digestión anaerobia de lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas, usando como co-sustrato residuos de matadero (contenidos estomacales de cerdo y fangos de flotación) en ensayos realizados tanto a escala piloto (reactores de 2000 L) como industrial (digestores municipales de lodos de depuradora). Cuando la co-digestión se realizó con contenidos estomacales de cerdo, se obtuvieron buenos resultados, tras una fase de adaptación, cuando se trató una mezcla con un 25% en volumen de dichos residuos, empleando un tiempo de residencia hidráulico de 17 días y una velocidad de carga orgánica del $2,9\text{ kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$. La producción de gas fue de $440\text{ m}^3/\text{t}_{\text{ST}}$. Para obtener estos resultados es necesaria la adición de hidróxido sódico al reactor (40% de NaOH en dosis de 5 ml/l de contenido estomacal) y recomendable, de cara a una implantación a escala industrial, la realización de un pretratamiento para eliminar restos de pajas no digeridas que puedan estar presentes en el residuo animal.

Cuando el co-sustrato empleado fueron los fangos de flotación, los mejores resultados se obtuvieron también con una mezcla con un 25% en volumen de fangos, empleando un tiempo de residencia hidráulico de 15 días. En estas condiciones, la producción específica de gas fue de $600-800\text{ m}^3/\text{t}_{\text{ST}}$. El co-tratamiento de los flotantes no requiere pretratamiento ni neutralización. El co-tratamiento en digestores municipales de digestión anaerobia de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales es posible con pequeños esfuerzos



operacionales, con los cuales se obtiene buenos resultados. El aumento de la producción de gas hace el proceso económicamente viable.

Como ya se ha indicado, son numerosas las plantas que operan a escala industrial que obtienen biogás a partir de mezclas de residuos ganaderos y residuos de matadero. En la tabla 12 se recogen los datos técnicos de algunas de ellas. De la información recopilada de las mismas se puede concluir lo siguiente:

- En muchas de las plantas consultadas en las que se usan restos de matadero como co-sustrato en la digestión anaerobia de residuos ganaderos, no se dispone de mucha información sobre el tipo de reactor empleado o el tiempo de residencia hidráulico. De los datos disponibles, la mayoría de las plantas emplean reactores agitados verticales, con tiempos de residencia hidráulicos en torno a 20 días.
- En la mayoría de las plantas consultadas, además de purines y restos de matadero se introducen otros residuos, como restos de comida, residuos lácteos o arcillas empleadas en el blanqueo del aceite vegetal. La proporción es variable, aunque la proporción de purines suele ser mayor (en torno al 85% de la mezcla). La producción de biogás oscila entre 40 y 50 m³/t mezcla, con una concentración en CH₄ que en muchos casos supera el 65%.
- Como excepción, la planta Åby, en Linkoping (Suecia) emplea un 75% de restos de matadero, produciendo 98 m³/t mezcla, con un contenido en CH₄ del 68%, aunque con un TRH de 50 días, en rango mesofílico.
- Muchas de las plantas consultadas trabajan en rango termofílico. En este caso, la etapa de higienización se realiza durante la propia digestión, gracias a la temperatura de operación y al tiempo de permanencia del residuo en el reactor. Las plantas que trabajan en rango mesofílico realizan una higienización previa del residuo (1 hora a 70°C).



Tabla 12. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de matadero

	Juneda- Lérida (España)	Nysted - Kettinge (Dinamarca)	Snertinge - Kalundborg (Dinamarca)	Fangel -Odense (Dinamarca)	Sinding-Ørre (Dinamarca)
Constructor/Gestor	TRACJUSA	Nysted BioGas A.m.b.a.	Føllenslev Energiselskab A.m.b.a	Fangel Miljø-& Energiselskab A.m.b.a.	Herning Municipal Utilities
Co-sustratos	Cerdo Lodos de depuradora de matadero	Ganaderos: (85,3%: 82 % Cerdo, 17% Vacuno) Otros (14,7%): R. industria azucarera, R. de curtidos, grasa y fangos de flotación de matadero, etc.	Ganaderos (61%: 37% de Vacuno y 63% de Cerdo) Otros (39%): Grasa y lodos de flotación de la industria alimentaria y lodos de depuradora	Ganaderos (87%: Vacuno y cerdo Otros (13%): Lodos de flotación de mataderos, residuos lácteos, residuos de la industria farmacéutica, etc.	Ganaderos (87%: 40% de Vacuno y 60% de cerdo) Otros (13%): Contenido intestinal de mataderos, residuos lácteos, arcillas usadas en la industria aceitera
Digestor	2 reactores CSTR de 3.000 m ³	5.000 m ³	3 reactores de 1.000 m ³	2 reactores de 1.600 m ³ y 1 de 550 m ³	3 reactores de 750 m ³
Pretratamiento	Trituración y desarenado	Higienización (MGRT de 8 horas a 55°C)	Higienización (MGRT 10 horas a 52,5°C)	Higienización a 60°C durante 3,5 horas	4 horas a 51°C FORSU (60°C, 2,5 h)
Capacidad de tratamiento	300 t/día	211 t/día	108 t/día	143 t/día	135 t/día
Tª de operación	35-38°C	38°C	52,5°C	37°C	51°C
Materia seca	3,5%		Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible
Tiempo residencia	20 días		Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible
Producción biogás	6.000-7.500 m ³ /día (20-25 m ³ /t mezcla)	7.123 m ³ /día (33,8 m ³ /t)	4.384 m ³ /día (40,6 m ³ /t)	6.027 Nm ³ /día (42 m ³ /t)	6.575 Nm ³ /día (48,7 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	> 65%		> 65%	Dato no disponible	Dato no disponible
Producción energética	16,3 MW	2.300kW	Dato no disponible	1.500 kW	Electricidad: 400 kW; Calor: 700 kW



Tabla 12. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de matadero (Cont.)

	Uppsala (Suecia)	Laholm (Suecia)	Åby - Linköping (Suecia)	Wertle (Alemania)	Frankenför (Alemania)	Pawłówko (Polonia)
Constructor/Gestor		Laholm Biogas AB		BGA Wertle	Frankenförde Vieh & Fleisch GmbH (FVF)	
Co-sustratos	Ganaderos matadero, orgánicos, farmacéuticos (glucosa)	Ganaderos (60%: 21% Vacuno y 33% cerdo) Matadero (40%)	Ganaderos (10%) Matadero (75%) Subprod. Aliment. (15%)	Ganaderos (60%) Matadero (40%)	Ganaderos (75% cerdo) Matadero y R. ind. Aceitera (25%)	Ganaderos (87%, cerdo) Matadero (13%)
Digestor	Reactor de mezcla completa: 2.800 m ³	1 tanque de mezcla de 700 m ³ 2 digestores de 220 m ³	2 de 3.700 m ³	1º: 2 de 3.200 m ³ 2º: 2 de 2.400 m ³	2 CSTR de 450 m ³	Dato no disponible
Pretratamiento	Higienización (70°C, 1 hora)	Higienización (70°C, 1 hora)	Higienización (70°C, 1 hora)	Higienización (70°C, 1 hora)	Higienización (18 días a 37°C)	Higienización (70°C, 1 hora)
Capacidad de tratamiento	Dato no disponible	150 m ³ mezcla /día	150 m ³ /día	300 t de mezcla/ día	47 m ³ /día	75 t/día
Tª de operación	55°C	35°C	37°C	39°C	37°C	Dato no disponible
Materia seca	Dato no disponible	10% (ST)	10-14% (ST)	5,5-6% (ST)	7,5% (ST)	Dato no disponible
Tiempo residencia	20 días	21 días	50 días	1º: 21 días 2º: 16 días	18 días	Dato no disponible
Producción biogás	2.000-3.000 m ³ /día	9.000 m ³ /día (60 m ³ /m ³)	14.520 m ³ /día (97 m ³ /t)	1.000 – 1.100 m ³ /día	2.550 m ³ /día	1.200 m ³ /día + 199 m ³ (almacen.)
Contenido en CH ₄ del biogás	65%	75%	67,6%	60-65%	70%	65%
Producción energética	Dato no disponible	20-30 GWh/año	Dato no disponible	2,5 MW	150 kW (elect.)	1,4 (Elect.) + 2,6 (calor) GWh/año



6.2 Co-digestión con residuos ganaderos y residuos pesqueros

Son numerosos los datos experimentales obtenidos en investigaciones realizadas a escala de laboratorio sobre el proceso de digestión anaerobia utilizando como sustrato residuos de la industria pesquera, ya sea como sustrato único o con otros sustratos como los residuos ganaderos. En las tablas 13 y 14 se recogen datos de producción de biogás a partir de diferentes residuos de la industria pesquera y con diferentes condiciones de operación.

Cuando se utilizan residuos de la industria pesquera como co-sustratos en procesos de digestión anaerobia pueden producirse efectos de inhibición de la actividad metanogénica específica (SMA) debido a la presencia de altas concentraciones de sal. En este sentido en el tratamiento de agua residual procedente del procesado de la almeja en reactores UASB y a 32°C se observó inhibición de la SMA a concentraciones mayores de 13,35 g Na⁺/L (Boardman et al., 1995). Vidal et al. (1997) observaron que en el tratamientos de agua residual de la industria del procesado de comida precocinada de pescado en un filtro anaerobio a 37°C y utilizando como inóculo sedimentos marinos, la inhibición se observó con 30 g NaCl/L. Por su parte, Gebauer (2004) observó que en la digestión de lodo salino de piscifactorías en reactores discontinuos y a 35°C, la inhibición de la SMA se produjo a una concentración de 26 g NaCl/L.



Tabla 13. Producción de biogás a partir de diferentes residuos pesqueros usados como sustrato único

Alimentación	Composición alimentación	Operación	Producción gas	% CH ₄	Referencia
Residuos de cangrejo		HSBF (operación en percolación e inundado) 35 °C	250-290 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾	> 70	O'Keefe et al. (1996)
Residuos sólidos de piscifactorías		UASB 24-25°C HRT: 22-38 d VCO: 0,23-0,75 g SV/L/d	400-600 m ³ biogás/t SV ⁽²⁾	80	Lanari y Franci (1998)
Lodo de piscifactorías salino	ST: 4,1-5,1% (sin diluir) Na: 5,3 g/L S%: 17,5 VFA: 0,6 g/L	CSTR semicontinuo Lodo diluido 1:1 HRT: 30 d 35 °C	220 m ³ CH ₄ /t SV ⁽³⁾	57,6	Gebauer (2004)
Aceite y residuos pesqueros	SV: 8-44%		360-750 m ³ CH ₄ /t SV (43-389 m ³ biogás/ton) ⁽⁴⁾		Folkecenter (2005)
Agua de industria de productos del mar (30 g NaCl)		AF VCO: 5,7-7,1 g/L/d 37°C	170 m ³ CH ₄ /t DQO ⁽¹⁾		Vidal et al. (1997)
Agua de cocción de cangrejo azul			6,6-10,0 m ³ biogás/ m ³ alimentación ⁽¹⁾ (68% CH ₄)		Rodenhizer and Boardman (1999)
Efluente residual de procesado atún		Lecho fijo ascendente 30°C	180 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Achour et al. (2000)
Agua sintética (conservera sardinas y atún)		30°C	230 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Palenzuela-Rollon et al. (2002)

⁽¹⁾ Ensayos en continuo a escala laboratorio; ⁽²⁾ Ensayos en continuo a escala piloto; ⁽³⁾ Ensayos en semicontinuo a escala laboratorio; ⁽⁴⁾ Ensayos en continuo a escala industrial



Tabla 14. Producción de biogás a partir de diferentes residuos pesqueros en procesos de co-digestión con otros sustratos

Alimentación	Composición alimentación	Operación	Producción gas	% CH ₄	Referencia
Pulpa sisal y residuos de pescado		Ensayos en batch 27°C HRT: 24 d	440-620 m ³ biogás/t SV ⁽¹⁾	58-65	Mdhandete et al. (1999)
20% residuos de pescado (cabezas, colas y vísceras de trucha), 70% purín de vacuno	93 g SV/L	Ensayos en batch 35°C 79,2 g SV/L	Residuos de pescado: 380 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾ Purín vacuno: 300 m ³ CH ₄ /t SV ⁽¹⁾		Callaghan et al. (1999)
97% estiércol cerdo, 2% residuo de aceite de pescado, 1% bentonita-bound oil		30°C HRT: 15 d	184 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾	65	Francese et al. (2000)
Residuos matadero, industriales, restaurantes y estiércol de cerdo	9,7-10,3% ST C/N: 8-11	CSTR 35°C OLR: 2,6-3,1 g/L/d HRT: 28-36 d	800-1000 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾	68,2-70,5	Murto et al. (2003)
20% residuos repostería, 80% estiércol de vaca	25% ST (res. orgánicos) 5,9-8% ST (estiércol)	CSTR 35/55°C OLR: 2,3-2,5 g/L/d HRT: 15/20 d	190-290 m ³ CH ₄ /t SV ⁽²⁾		Paavola et al. (2006)

⁽¹⁾ Ensayos en discontinuo a escala de laboratorio; ⁽²⁾ Ensayos en continuo a escala laboratorio

En la tabla 15 se recogen datos técnicos de plantas ubicadas en Dinamarca que operan a escala industrial y en las que se co-digieren residuos ganaderos y residuos procedentes de la industria del pescado. En todas, además de purines y residuos pesqueros, se co-digieren otros residuos, como residuos lácteos,



farmacéuticos y, en muchas de las plantas consultadas, residuos de matadero (como se recoge anteriormente, tabla 11).

De las plantas consultadas, la mayoría opera en rango termofílico (53-55°C), aprovechando esta temperatura de operación y el tiempo de residencia para la eliminación de patógenos. Las plantas que operan en rango mesofílico realizan una etapa previa de higienización (1 hora a 70°C).

No se dispone de información sobre el tipo de reactor utilizado en todas las plantas consultadas, pero las que facilitan este dato usan reactores verticales agitados o CSTR, y una de ellas (planta de Thorsø en Dinamarca) utiliza un CSTR seguido de un PFR.

La proporción purín:co-sustrato es variable, empleando en todas las plantas consultadas mayor proporción de purín en la mezcla alimentada (70 al 90%). La producción de biogás es también bastante variable (entre 27 y 97 m³/t mezcla alimentada) con un contenido en CH₄ superior al 65% (dato no facilitado por todas las plantas consultadas).

En todas estas plantas el digestato se emplea como fertilizante. En la planta de Hegndal, en Hemmet (Dinamarca), el digestato obtenido se somete a un proceso de decantación. La decantación permite obtener una fracción sólida (10-15%) y otra líquida (85-90%). La fracción sólida contiene entre el 80-83% del fósforo del purín y entre el 20-25% del nitrógeno orgánico. La fracción líquida, con elevado contenido en N-amoniaco y bajo contenido en fósforo, se concentra en una unidad de evaporación a vacío, que utiliza el calor generado con el biogás. El evaporador produce un concentrado fertilizante (aproximadamente el 20%) y un 80% de agua casi pura. Al evaporador se adiciona ácido para capturar el N-amoniaco, evitando que pase a la fase gas.

Por su parte, en la planta de Blåbjerg (Dinamarca), también se realiza una separación sólido-líquido en el digestato y, en este caso, la fracción sólida se quema en la planta de co-generación.



Tabla 15. Datos técnicos de plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos del procesado de pescado

	Hegndal - Hemmet (Dinamarca)	Davinde (Dinamarca)	Vester Hjerimitslev (Dinamarca)	Blåbjerg (Dinamarca)	Hegndal - Hemmet (Dinamarca)
Constructor/Gestor	Jenny and Kent Skaaning	Davinde Energiselskab A.m.b.a.	Vester Hjerimitslev Energiselskab	Blåbjerg Biogas A.m.b.a.	Jenny and Kent Skaaning
Co-sustratos	Ganaderos (95%, cerdo) Pesqueros grasos (5%)	Ganaderos (89%: cerdo y vacuno) Lodo y residuo de pescado (11%)	Ganaderos (76%: cerdo y vacuno) Pesqueros (lodos flotantes) y residuos de curtidos (24%)	Ganaderos (72%, cerdo y vacuno) Pesqueros, orgánicos de alimentos, lodos de depuradora, etc (28%)	Ganaderos (95%, cerdo) Residuos grasos procedentes de la industria del pescado (5%)
Digestor	Vertical de 800 m ³	750 m ³	3 × 500 m ³	2 × 2.500 m ³	Vertical de 800 m ³
Pretratamiento	Dato no disponible	No se realiza	4,5 horas a 57°C (Tras la digestión)	MGRT 8 horas a 53,5 °C	Dato no disponible
Capacidad de tratamiento	52,7 t/día	28 t/día	54 t/día	309 t/día	52,7 t/día
Tª de operación	Termofílico	36°C (Mesofílico)	37 °C (Mesofílico)	53,5°C (Termofílico)	Termofílico
Materia seca	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible
Tiempo residencia	16 días	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	16 días
Producción biogás	3.560 m ³ /día (67,6 m ³ /t)	822 m ³ /día (29,4 m ³ /t)	2.740 m ³ /día (50,7 m ³ /t)	8.500 m ³ /día (27,5 m ³ /t)	3.560 m ³ /día (67,6 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible
Producción energética	350 kW	Dato no disponible	1.610 kW	7.840 kW	350 kW



7 Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea

No se ha encontrado mucha información sobre la utilización de este tipo de co-sustrato. En la planta de Vila-Sana (España) se añade leche como co-sustrato, junto con otros residuos orgánicos, como restos de fruta. En las plantas danesas de Fangel, Ørre, Blåbjerg y Hasjøj se añaden residuos lácteos junto con residuos de matadero y de la industria pesquera, pero se desconoce la proporción en la que se añaden estos residuos.

Sería necesario una investigación en profundidad sobre el proceso de co-digestión, para determinar la proporción óptima residuo ganadero: residuo lácteo, así como las condiciones óptimas de operación y las producciones alcanzables de biogás y metano.

8 Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiesel

La glicerina es un subproducto de la fabricación del biodiesel. El mercado de la glicerina es limitado, por lo que, cuando la capacidad de producción de biodiesel aumente, la glicerina terminará siendo un subproducto de relativamente bajo valor, aumentando el coste de la producción de biodiesel. La utilización de la glicerina como materia prima en otras industrias puede ayudar a que la producción de biodiesel sea más factible económicamente.

Una de las posibles aplicaciones para este residuo es la co-digestión anaeróbica con otros residuos orgánicos, con el objetivo de aumentar el potencial de biogás. La glicerina presenta un pH adecuado para la digestión anaerobia y además es muy biodegradable.

Se han encontrado datos de plantas que operan a escala industrial en las que la glicerina se añade como tercer co-sustrato al proceso de digestión anaerobia para compensar el efecto inhibitorio que causa el nitrógeno amoniacal producido como consecuencia de un elevado contenido de nitrógeno en los residuos tratados. El elevado contenido en carbono de la glicerina permite aumentar la relación C/N en la mezcla, evitando fenómenos de inhibición debidos al nitrógeno.

Estudios experimentales realizados muestran que la adición de glicerina en procesos de co-digestión anaerobia aumenta la producción de biogás. Esta es una de las principales conclusiones obtenidas por Amon et al. (2006), que optimizaron la digestión anaerobia de purín de cerdo con silo de maíz, utilizando un suplemento de glicerina. Los ensayos fueron realizados en discontinuo a temperatura de 38-40°C y



en ellos observa que la producción de biogás es especialmente alta con adiciones de glicerina de 3-6%, mientras que a concentraciones de glicerina de 8% y 15% se observa una inhibición debida a la presencia de grandes cantidades de ácidos propiónico y butírico. Sin embargo, a escala industrial, se tiene constancia de que en la planta de biogás de Hashoej en Dinamarca, alimentan el reactor con un 9% de glicerina produciendo altos caudales de biogás.

En la tabla 16 se recogen datos técnicos de dos plantas en las que se trabajó con residuos de glicerina en el proceso de co-digestión con residuos ganaderos y otros residuos orgánicos. La planta Skovbaekgaard, en Dinamarca, es la única que, hasta el momento, obtiene biogás a partir de la co-digestión de residuos ganaderos (de vacuno, en concreto) y glicerina procedente de la fabricación de biodiesel. No se conocen datos sobre la proporción en la que se añaden los co-sustratos pero se comprueba cómo la adición de glicerina al proceso produjo un aumento considerable de la producción de biogás (del 186%). La glicerina se calienta previamente a 70°C, para hacer más sencillo su manejo y dosificación (ésta se realiza cada 20 minutos).



Tabla 16. Datos técnicos de plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de glicerina

	Bioenergie Ahden GmbH & Co. KG Biogas Plant, Büren-Ahden (Alemania)	Skovbaekgaard Biogas Plant, Holsted (Dinamarca)
Gestor	Construcción: Biogas Nord Seguimiento: University Southern of Denmark	La propia granja productora del purín
Co-sustratos	Ganaderos (28,5%, cerdo) Otros (71,5%): residuos de comida (Se ha añadido glicerina y mezclas glicerina/agua)	Ganaderos (vacuno: 450 animales) Glicerina (biodiesel) 1000 m ³ /año Ocasionalmente, grasas vegetales (avena): 100 t/año máximo
Dimensiones del digestor	Digestores primarios: 2 verticales de 1.527 m ³ cada uno Digestores secundarios: 2 verticales de 2.661 m ³ cada uno	Digestor primario de 1.200 m ³
Capacidad de tratamiento	38 m ³ /día (20 dosis)	Dato no disponible
Temperatura de operación	38-40°C (mesofílico)	Digestor primario: 51°C Digestor secundario: 33°C
Materia seca	15%	Dato no disponible
Tiempo de residencia	Digestor primario: < 48 días Digestor secundario: < 46 días	Digestor primario: 18 días Digestor secundario: 3 meses
Producción de biogás	Dato no disponible	3.000-3.500 m ³ /día sin adición de glicerina 10.000 m ³ /día con glicerina
Contenido en CH ₄ del biogás	65-70%	52-55%
Contenido en SH ₂	300 ppm	Dato no disponible
Producción energética	750 kW	5.000-8.000 kWh/día



Necesidades de I+D detectadas

Como conclusión a la información encontrada cabe destacar que, aunque se han encontrado resultados de investigación y existen algunas plantas a escala industrial que emplean este tipo de residuo como co-sustrato, los estudios son muy escasos. Sería necesario un estudio en profundidad del proceso, tanto en rango mesofílico como termofílico y empleando tanto purín de cerdo como de vacuno, para determinar las proporciones de glicerina que producen inhibición en cada caso. Además, debería estudiarse si realizando una buena aclimatación del inóculo sería posible aumentar la proporción de glicerina en las mezclas sin causar inhibición.

9 Co-digestión de residuos ganaderos y otros residuos orgánicos

Aunque no son objeto del proyecto PROBIOGAS los procesos de co-digestión anaerobio de residuos ganaderos con otros tipos de residuos orgánicos, se incluyen en las tablas 16 y 17 datos de plantas que co-digieren residuos ganaderos con restos de comida, aguas residuales o lodos, pues pueden resultar de interés.



Tabla 17. Datos técnicas de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con aguas residuales y lodos

	Nistelrode (Holanda)	Biovakka - Vehmaa (Finlandia)	Spilamberto Modena (Italia)	Kalmar (Suecia)
Constructor/Gestor	Granja ganadera	Biovakka	Huber Technology (Hans Huber A.G.)	Kalmar Biogas AB
Co-sustratos	Ganaderos (81,5%: 72,6% avícola y 27,4% porcino) Otros (18,5%): lodo floculado procedente de industria cárnica y del pescado.	Ganaderos (71,4%: cerdo y vacuno) Lodos industriales (7,1%) Lodos EDAR (21,4%)	Ganadero (80% estiércol porcino y vacuno) Otros (20%): lodos de aguas residuales	Estiércol Aguas residuales
Digestor	Digestor principal de 75 m ³ y digestor secundario de 35 m ³	Digestor de 6.700 m ³ (acero)	12.000 m ³	Dato no disponible
Pretratamiento	Dato no disponible	Residuo ganadero: homogeneización a 12 mm e higienización a 70°C durante 1 h	Dato no disponible	Dato no disponible
Capacidad de tratamiento	9,1 m ³ /día	329 t/día	600 m ³ /día	Dato no disponible
Tª de operación	Dato no disponible	Dato no disponible	30-40°C	35°C
Tiempo residencia	Dato no disponible	Dato no disponible	20 días	Dato no disponible
Producción biogás	650 m ³ /día (71,4 m ³ /t)	1.534 m ³ /día (4,7 m ³ /t)	Dato no disponible	2,5 Mm ³
Contenido en CH ₄ del biogás	64%	60 – 65%	Dato no disponible	50-88%
Producción energética	146 kW (340 MWh/año)	4-5 MW	Dato no disponible	

**Tabla 18.** Datos técnicas de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con FORSU

	Im Brahm, Essen (Alemania)	Ballytobim (Irlanda)	Karpalund Kristianstad (Suecia)	Studsgaard (Dinamarca)
Constructor/Gestor	Krieg & Fischer Ingenieure GMBH		Empresa municipal de tratamiento de residuos	Herning Municipal Utilities
Co-sustratos	Ganaderos: Purín de cerdo Otros: Residuos de cocina, grasas y grano	Ganaderos (64% porcino) Otros (36%): Residuos procedentes de la industria alimentaria y rechazos de cocina	Ganaderos (50% de estiércol) Otros (50%: 45% orgánicos de la industria alimentaria y 5% orgánicos de hogares)	Ganaderos (86,5%: 22% vacuno y 78% cerdo) Otros (13,5%): Industria alimentaria y residuos de hogares
Digestor	CSTR de 1.205 m ³	1º: 150 m ³ 2º: 450 m ³	Dato no disponible	2 reactores de 3.300 m ³ cada uno
Pretratamiento	Ganadero: higienización (70°C, 1 h, d _p ≤ 1 cm) Separación de plásticos, piedras y otros	Higienización del residuo agroindustrial (70°C, 1h)	Higienización del residuo agroindustrial (70°C, 1h)	Dato no disponible
Capacidad de tratamiento	Dato no disponible	22 t/día	~ 197 t/día	266 t/día
Tª de operación	35°C	55°C (20 días) + 37°C (30 días)	38°C	52°C
Tiempo residencia	Dato no disponible	20 días (primer digestor) + 30 días (segundo digestor)	20-24 días	16 días
Producción biogás	500 m ³ biogás/t residuo	600 m ³ /día (27,3 m ³ /t)	8.000 – 9.000 m ³ /día (43,1 m ³ /t)	15.616 m ³ /día (58,7 m ³ /t)
Contenido en CH ₄ del biogás	Dato no disponible	Dato no disponible	65-70%	Dato no disponible
Producción energética	380 kW	Dato no disponible	40.000 mWh/año	Dato no disponible



Tabla 18. Datos técnicas de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con FORSU (Cont)

	Århus Nord (Dinamarca)	Lemvig (Dinamarca)	Holsworthy Devon (Reino Unido)	Gäufelden (Alemania)
Constructor/Gestor	Århus Municipal Utilities	Lemvig Biogasanlæg A.m.b.a	Farmatic Biotech Energy ag. / Summerleaze Group	
Co-sustratos	Ganaderos (88%: 15% vacuno 85% cerdo) Otros (12%): Residuos procedentes de las industrias médica, vegetal, de curtidos y residuos de hogares	Ganaderos (83%: 40% vacuno 59% cerdo y 1% de otros) Otros (17%): Residuo alimentario y fangos EDAR	80% estiércol vacuno, porcino y avícola 20% residuos orgánicos de comida	Ganadero (46%: 30% vacuno, 40% cerdo y 30% otros) Otros (54%: 12% residuo de cosechado, 70% residuos alimentarios y 18% pan duro)
Digestor	3 reactores de mezcla completa (2 de 3.600 m ³ y 1 de 1.300 m ³)	3 reactores CSTR de 2.533 m ³ cada uno	2 reactores de 4.000 m ³ cada uno	2 reactores CSTR en serie de 2.281 m ³ cada uno
Capacidad de tratamiento	392 t/día	437 t/día	400 t/día	42,5 t/día
Tª de operación	38°C para el estiércol y los residuos orgánicos 52°C para los residuos de hogares	52,5°C (termofílico)	37°C	35°C (mesofílico)
Tiempo residencia	Dato no disponible	Dato no disponible	20 días	Dato no disponible
Producción biogás	10.411 m ³ /día (36,8 m ³ /t)	14.795 m ³ /día (33,9 m ³ /t)	10.685 m ³ CH ₄ /día (26,7 m ³ /t)	Dato no disponible
Contenido en CH ₄ del biogás	> 65%	> 65%	Dato no disponible	Dato no disponible
Contenido en SH ₂	< 500 ppm (tras filtro biológico)	Dato no disponible	Dato no disponible	Dato no disponible
Producción energética	3.945 kW	Dato no disponible	14,6 x 10 ⁶ kWh/año	716 kW



10 Conclusiones

Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera

- Actualmente, el proceso de co-digestión anaerobia con alperujo no ha sido desarrollado a escala industrial.
- Investigaciones realizadas a escala de laboratorio indican que una proporción purín:alperujo de 75:25 es la óptima para la co-digestión de estos dos tipos de residuos.

Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de naranja

- Apenas existen estudios sobre co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y residuos de naranja. En algunos ensayos de laboratorio se utilizan los residuos ganaderos como inóculo durante la fase de arranque para la digestión de residuos de naranja en reactores de mezcla completa.
- El pretratamiento de residuos de naranja con diferentes hongos (*Sporotrichum*, *Aspergillus*, *Fusarium* and *Penicillium*) aumenta los niveles de producción de biogás (450-540 m³/t residuo de naranja).
- No se conocen casos de plantas industriales que empleen residuos de naranja como co-sustrato.

Co-digestión de residuos ganaderos y restos de remolacha

- Investigaciones a escala de laboratorio muestran que la co-digestión de estiércol de vacuno con restos de remolacha azucarera aumenta la producción de metano. Sin embargo, cuando se añaden restos de remolacha en exceso se producen fenómenos de inhibición (raíces > 15%; ramas, hojas y raíces > 30-40%).
- La planta de Emilia Romagna (Italia) emplea cebollas, remolacha, patatas y maíz como co-sustratos en la digestión anaerobia con purín de vacuno (relación purín/residuos de 0,7). Consta de 2 digestores de mezcla completa en serie y produce 100,7 m³/t mezcla residuos con un contenido en CH₄ del 55%, operando en rango mesofílico. No se dispone de datos sobre el tiempo de residencia hidráulico de la planta.



Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos

- Existe un gran número de plantas industriales de co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos (principalmente maíz), ubicadas en su mayoría en Alemania, donde operan plantas de biogás que sólo utilizan cultivos energéticos como sustrato en la digestión anaerobia.
- Las plantas operan en rango mesofílico, con reactores agitados y con tiempos de residencia hidráulicos entre 20 y 30 días.
- La proporción residuo ganadero/cultivo energético es variable, así como la producción de biogás, aunque la concentración de metano en el biogás obtenido se mantiene en valores entre 50-55%.
- Se han alcanzado producciones de 200 m³ de biogás/t mezcla alimentada operando con reactores en dos fases, en rango mesofílico el primero y termofílico el segundo, con TRH entre 15-20 días en cada uno de los reactores y empleando proporciones purín:cultivo energético de 1:7 (planta de Archea, en Suedhorsten - Alemania).

Co-digestión de residuos ganaderos y residuos animales

Residuos de matadero

- Dinamarca es el país que cuenta con un mayor número de plantas (en muchas de ellas se introducen además residuos procedentes de la industria pesquera, comida para peces o procesado de pescado). Le siguen Suecia, Alemania y Polonia. España cuenta con una planta ubicada en Juneda (Lérida).
- En muchas de las plantas consultadas en las que se usan restos de matadero como co-sustrato en la digestión anaerobia con residuos ganaderos, no se dispone de mucha información sobre el tipo de reactor empleado en la digestión o el tiempo de residencia hidráulico. De los datos disponibles, muchas plantas emplean reactores agitados verticales, con tiempos de residencia hidráulicos en torno a 20 días.
- En la mayoría de las plantas consultadas, además de purines y restos de matadero se introducen otros residuos, como restos de comida, residuos lácteos o arcillas empleadas en el blanqueo del aceite vegetal. La proporción es variable, aunque en la mayoría de las plantas es mayor la proporción de purines (en torno al 85% de la mezcla). La producción de biogás oscila entre



40 y 50 Nm³/t mezcla, con una concentración en CH₄ que en muchos casos supera el 65%.

- Como excepción, la planta Åby, en Linköping (Suecia) emplea un 75% de restos de matadero, produciendo 98 Nm³/t mezcla, con un contenido en CH₄ del 68%, aunque con un TRH de 50 días, en rango mesofílico.
- Muchas de las plantas consultadas trabajan en rango termofílico. En este caso, la etapa de higienización se realiza durante la propia digestión, gracias a la temperatura de operación y al tiempo de permanencia del residuo en el reactor. Las plantas que trabajan en rango mesofílico realizan una higienización previa del residuo (1 hora a 70°C).

Residuos pesqueros

- Las plantas que usan como co-sustrato residuos de la industria pesquera se ubican en Dinamarca. En todas, además del purín y los residuos pesqueros, se co-digieren otros residuos, como residuos lácteos, farmacéuticos y, en muchas de las plantas, residuos de matadero.
- De las plantas consultadas, la mayoría opera en rango termofílico (53-55°C), aprovechando esta temperatura de operación y el tiempo de residencia para la eliminación de patógenos. Las plantas que operan en rango mesofílico realizan una etapa previa de higienización (1 hora a 70°C).
- No se dispone de información sobre el tipo de reactor utilizado en todas las plantas consultadas, pero las que facilitan este dato usan reactores verticales agitados o CSTR, y una de ellas (planta de Thorsø en Dinamarca) utiliza un CSTR seguido de un PFR.
- La proporción purín:co-sustrato es variable, empleando mayor proporción de purín en la mezcla alimentada (70 al 90%). La producción de biogás es también bastante variable (entre 27 y 97 Nm³/t mezcla alimentada) con un contenido en CH₄ superior al 65%.

Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea

- No se ha encontrado mucha información sobre la utilización de este tipo de co-sustrato. En la planta de Vila-Sana (España) se añade leche como co-sustrato, junto con otros residuos orgánicos como restos de fruta. En las plantas danesas de Fangel, Ørre, Blåbjerg y Hasjøj, se añaden residuos lácteos junto con residuos de matadero y de la industria pesquera.



Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiesel

- De las investigaciones realizadas a escala de laboratorio en rango mesofílico se ha encontrado que a concentraciones de glicerina más altas del 6% se produce una sobrecarga orgánica en el reactor y una baja producción de biogás. Sin embargo, a escala industrial, se tiene constancia de que en la planta de biogás de Hashoej en Dinamarca, alimentan el reactor con un 9% de glicerina, produciendo altos caudales de biogás.
- En la planta “Skoubaekgaard Biogas Plant” la adición de glicerina ha conducido a un aumento en la producción de biogás desde 3.000-3.500 m³/día a 10.000 m³/día. En esta planta se co-digiere purín añadiendo 1.000 m³ de glicerina al año y, ocasionalmente, restos de avena y grasas vegetales. Se desconoce la proporción que de glicerina en la mezcla alimentada al reactor. Esta planta consta de dos reactores: el primario trabaja en rango termofílico con un TRH de 18 días y el secundario en rango mesofílico, con un TRH de 3 meses. El contenido en CH₄ del biogás es del 52-55%.
- En otras plantas el aporte de glicerina se realiza en pequeñas cantidades, para aumentar la relación C/N de los residuos co-digeridos (residuos ganaderos, residuos agroalimentarios), evitando que el alto contenido en N de algunos residuos, produzca inhibición por presencia de nitrógeno amoniacal.



11 Referencias bibliográficas

- Achour, M., Khelifi O, Bouazizi, I. and Hamdi, M. (2000). Design of an integrated bioprocess for the treatment of tuna processing liquid effluents. *Process Biochemistry* 35, 1013-1017.
- Al Seadi, T. (2000) Danish Centralised Biogas Plants. Bioenergy Department, University of Southern Denmark.
- Amon, T., Amon B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch E. and Zollitsch W. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *International Congress Series* 1293, 217-220.
- Angelidaki, I. and Ahring, B. (1997a). Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future. In: *III curso de Ingeniería Ambiental, Flotats X.*, (Ed.). Universidad de Lleida, pp. 336-342.
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. (1997b). Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 8: 221-226.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. and Ahring, B.K. (1997c). Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent. *Water Science and Technology* 36 (6-7), 263-270.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K., Deng, H. and Schmidt, J.E. (2002). Anaerobic digestion of olive oil mill effluents together with swine manure in UASB reactors. *Water Science and Technology* 45 (10), 213-218.
- Angelidaki, I. and Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109 (1-3), 95-105.
- Angelidaki, I., Boe, K. and Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science and Technology* 52 (1-2), 189-194.
- Aspé, E., Marti, M.C. and Roeckel, M. (1997). Anaerobic treatment of fishery wastewater using a marine sediment inoculum. *Water Research* 31(9), 2147-2160.
- Azaizeh, H. and Jadoun, J. (2007). Codigestion of olive mill wastewater and swine manure using UASB bioreactor for biogas production. *Proceeding of the*



International Conference Progress in Biogas. Stuttgart, Alemania, 19-21 Sep, 267-271.

- Burton, C.H. and Turner, C. (2003). Manure Management. Treatment Strategies for Sustainable Agriculture, Burton CH., Ed.; Silsoe Research Institute, UK.
- Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Forster, C.F., (1999). Co-digestion of waste organic solids: batch studies. *Bioresource Technology* 67, 117-122.
- Cuetos, M.J., Gomez, X., Otero M. and Morán, A. (2008). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal* 40(1): 99-106.
- DeBruyn, J., House, H. and Rodenburg, J. (2006). Ontario Large Herd Operators European Anaerobic Digestion Tour Report: Germany, Denmark and the Netherlands.
- Dhoub, A., Aloui, F., Hamad, N. and Sayadi, S. (2006). Pilot-plant treatment of olive mill wastewaters by *Phanerochaete chrysosporium* coupled to anaerobic digestion and ultrafiltration. *Process Biochemistry* 41, 159-167.
- Edström, M. (2003). Anaerobic treatment of animal byproducts from slaughterhouses at laboratory and pilot scale. *Applied Biochemistry Biotechnology* 109, 127-138.
- Ferreira, L., Duarte, E., Silva, C. y Malfeito, M. (2007) Fruit wastes bioconversion for anaerobic co-digestion with pig manure. Process development for the recycling in decentralised farm scale plants. *Proceeding of the International Conference Progress in Biogas. Stuttgart, Alemania, 19-21 Sep, 135-140.*
- Flotats, X., SARquella, L. (2008). Producció de biogas per codigestió anaerobia. Institut català d'Energia. Generalitat de Catalunya.
- Flotats, X. and Gibert, V. (2002). Mas el Cros biogas plant. Evaluation of 18 years in operation. In: S. Kalyuzhnyi (Ed.). *Proceedings of the 7th FAO/SREN workshop on "Anaerobic digestion for sustainability in waste (water) treatment and re-use"*. Moscow State University. Vol. 1, pp. 172-180.
- Folkecenter (2005). Folkecenter biogas technology for licence production. http://WWW.folkecenter.dk/en/biogas/Folkecenter_biogas_thecnology.pdf. 18/10/2005.



- Francese, A.P., Aboagye-Mathiesen, G., Olesen, T., Cordoba, P.R. and Siñeriz, F., (2000). Feeding approaches for biogas production from animal wastes and industrial effluents. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 16, 147-150.
- Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Bozinis, N.A. and Lyberatos, G. (1996). Anaerobic Codigestion of Agricultural Industries Wastewaters. *Water Science and Technology* 34 (11), 67-75.
- Gebauer, R., (2004). Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production. *Bioresource Technology* 93, 155-167.
- Gioannis, G., Muntoni, A., Poletti, A. and Pomi, R. (2007). Hydrogen production through anaerobic digestion of different solid and liquid waste: Batch and semi-continuous tests. *Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*.
- Gunaseelan, V.N. (2004) Biochemical methane potential of fruit and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 26, 389-399.
- DeBruyn, J. House, H. and Rodenburg, J. (2006) Ontario Large Herd Operators European Anaerobic Digestion Tour Report. Germany, Denmark and the Netherland. August 21 – 29. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (www.lho-ontario.ca)
- Kaporaju, P., Luosterinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J. and Rintala, J. (2001). Codigestion of energy crops and industrial confectionery byproducts with cow manure: Batch-scale and Farm-scale evaluation. *Proceedings of the 9th World Congress Anaerobic Digestion, Anwerpen, Belgium, Sep 2-6, 1, 363-368*.
- Lanari, D. and Franci, C. (1998). Biogas production from solid wastes removed from a fish farm effluent. *Aquatic Living Resources* 11(4), 289-295.
- Lane, A.G. (1984). Anaerobic digestion of orange peel. *Food Technology Australia* 36(3), 125-127.
- Mhandete, A., Kivaisi A., Rubindamayugi, M. and Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource Technology* 95, 19-24.
- Murto, M., Björnsson, L. and Mattiasson, B., (2003). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management* 70, 101-107.
- Nallathambi Gunaseelan, N. (2004) Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 26, 389–399.



- Naparaju, P.L.N. and Rintala, J.A. (2006). Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste. *Environmental Technology* 27(6), 623-633.
- O'Keefe, D.M., Owens, J.M. and Chynoweth, D.P. (1996). Anaerobic composting of crab-picking wastes for byproduct recovery. *Bioresource Technology* 58, 265-272.
- Paavola, T., Syväsalu, E. and Rintala, J. (2006). Co-digestion of manure and biowaste according to the EC Animal By-Products Regulation and Finnish national regulations. *Water Science & Technology* 53 (8), 223-231.
- Palatsi, J., Campos, E., Torres, M., Jiménez, M., Porras, S., Flotats, X. (2005). Manure management, anaerobic digestion and acidification: key processes for a pig slurry thermo-concentration treatment. Full-scale evaluation. Proceedings of the 4th Internacional Symposium. *Anaerobic Digestion of Solid Waste. Volumen II.* pp.189-194. Ahring, B.K. & Hartmann, H., editors. Copenhagen (Denmark).
- Palatsi, J., Campos-Pozuelo, E., Torres, M., Porras, S., Flotats, X (2004) Full-scale combination of anaerobic digestion and concentration by evaporation in Garrigues (Lleida, Spain): evaluation after 2 years of operation. *Sustainable Organic Waste Management for environmental Protection and Food Safety.* ISBN: 84-689-0828-2. Volumen: II. pp. 155-158. In Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R., Paredes, C. (Eds). Murcia (España)
- Palenzuela-Rollón, A., Zeeman, G., Lubberding, H.J., Lettinga, G. and Alaerts, G.J., (2002). Treatment of fish processing wastewater in a one or two-step upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Water Science and Technology* 45 (10), 207-212.
- Resch, C., Grasmug, M., Smeets, W., Braun, R. and Kirchmayr, R. (2006) Optimised anaerobic treatment of house-sorted biodegradable waste and slaughterhouse waste in a high loaded half technical scale digester *Water Science and Technology* 53 (8), 213-221.
- Rieradevall, J., Segarra, J., Mitjà, A. (1985). Programa de seguiment de plantes de digestió anaeròbia pel tractament d'excrements líquids. Balanç energètic i del procés de depuració. *A Fòrum Energètic. Jornades de debat sobre el sector energètic*, nov. 1984. Ed. Sirocco, Vol. 15, pp. 289-295.
- Rodenhizer, J.S. and Boardman, G.D., (1999). Collection, analysis and utilization of biogas from anaerobic treatment of crab processing waters. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 8 (2), 59-67.



- Rosenwinkel, K.H. and Meyer, H. (1999). Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters. *Water Science and Technology* 40 (1), 101-111.
- Rutledge, B. (2004) Swedish Biogas Industry Education Tour 2004: Observations and Findings. WestStart-CALSTART, Inc.
- Schäfer, W., Evers, L., Lehto, M. and Granstedt, A. (2007). Two phase continuous digestion of solids manure on-farm. *Proceeding of the International Conference Progress in Biogas*. Stuttgart, Alemania, 19-21 Sep, 167-172.
- Soldano, M., Fabbri, C. and Piccinini, S. (2007) Co-digestion plant in dairy cattle farm in Emilia Romagna region (Italy). *Proceeding of the International Conference Progress in Biogas*. Stuttgart, Alemania, 19-21 Sept, 95-99.
- Srilatha, H.R., Nand, K., Babu, K.S. and Madhukara, K. (1995). Fungal pretreatment of orange processing waste by solid-state fermentation for improved production of methane. *Process Biochemistry* 30(4), 327-331.
- Umetsu, K., Yamazaki, S., Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I., Komiyama, M. (2002) Fertilizer value of anaerobic co-digested dairy manure and food processing wastes, *Greenhouse Gases and Animal Agriculture*, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 331– 342.
- Umetsu, K., Yamazaki, S. Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C.; Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I. and Komiyama, M. (2006). Anaerobic co-digestion of dairy manure and sugar beets. *International Congress Series*, 1293, 307-310.
- Vidal, G., Aspé, E., Martí, M. and Roedel, M. (1997). Treatment of recycled wastewaters from fishmeal factory by an anaerobic filter. *Biotechnology Letters* 19(2), 117-121.
- Viswanath, P., Devi, S.S. and Nand, K. (1992). Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production. *Bioresource Technology* 40(1), 43-48.
- Wang, Z.J. and Banks, C. J. (2003). Evaluation of a two stage anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes. *Process Biochemistry* 38 (9), 1267-1273.