



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MASTER

***EVALUACIÓN DEL POTENCIAL METANOGENICO DE
LAS FRACCIONES LÍQUIDA Y SÓLIDA EN LODO
PRIMARIO Y SECUNDARIO Y EN LODO SECUNDARIO
PRE-TRATADO TÉRMICAMENTE***

EVA MARÍA ARRANZ PÉREZ
SEPTIEMBRE, 2014

SARA ISABEL PÉREZ ELVIRA, profesor/a del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Valladolid

INFORMA:

Que D. EVA MARÍA ARRANZ PÉREZ ha realizado bajo su dirección el Trabajo Fin de Máster titulado **Evaluación del Potencial Metanogénico de las Fracciones Líquida y Sólida en Lodo Primario y Secundario y en Lodo Secundario Pre-tratado Térmicamente.**

Valladolid, *día* de *SEPTIEMBRE* de 2014

Fdo. Nombre y apellidos del Tutor

Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Master en Ingeniería Ambiental, para la evaluación de Trabajos Fin de Master, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo **“Evaluación del Potencial Metanogénico de las Fracciones Líquida y Sólida en Lodo Primario y Secundario y en Lodo Secundario Pre-tratado Térmicamente”**, presentado por el alumno D. *Eva María Arranz Pérez*, decidió otorgarle la calificación de _____.

Valladolid, *día de Septiembre de 2014*

El Presidente

El Secretario

Fdo.:

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

ÍNDICE

1. Introducción.....	6
1.1. Digestión anaerobia de lodos de depuradora.....	6
1.2. Pretratamiento de lodos previo a digestión.....	7
1.3. Aspectos positivos de la hidrólisis térmica.....	7
2. Objetivos.....	9
2.1. Objetivo general.....	9
2.2. Objetivos específicos.....	9
3. Metodología.....	9
3.1. Planteamiento experimental: plan de trabajo.....	9
3.2. Fangos empleados.....	12
3.3. Ensayos de biodegradabilidad.....	13
3.4. Técnicas analíticas.....	14
3.5. Parámetros de respuesta.....	15
4. Resultados y discusión.....	16
5. Conclusiones.....	25
7. Líneas futuras.....	25
8. Agradecimientos.....	26
9. Bibliografía.....	26

1. Introducción

1.1. Digestión anaerobia de lodos de depuradora

En el proceso de depuración de las aguas residuales se genera gran cantidad de lodo. Lodos de tipo primario y secundario ó biológico. Generalmente, para el tratamiento de estos lodos en la depuradora, se mezclan ambos, formando el lodo mixto.

El tratamiento del fango mixto consiste en un proceso de varias etapas. Primeramente, tiene lugar el espesado, por centrifugación por ejemplo, aumentando así su concentración en sólidos al 5-8% frente al 1-2% inicial. Con esto, se consigue reducir el volumen de lodos, lo que facilita y permite optimizar las condiciones de trabajo.

El siguiente paso es la estabilización de los lodos. Normalmente, sometiendo al fango a un proceso de digestión anaerobia. En este proceso, el contenido de materia orgánica del fango disminuye a favor de la obtención de biogás (metano más dióxido de carbono). Además, el producto final resultante es un lodo mucho más estable, libre de patógenos, utilizable para otros fines, como puede ser para enmienda agronómica, por ejemplo.

A grandes rasgos, el proceso de digestión anaerobia se comprende de dos cambios importantes, la formación de ácidos volátiles y la producción de gas metano por parte de las bacterias anaerobias a partir de dichos ácidos. Todo transcurre en ausencia de oxígeno.

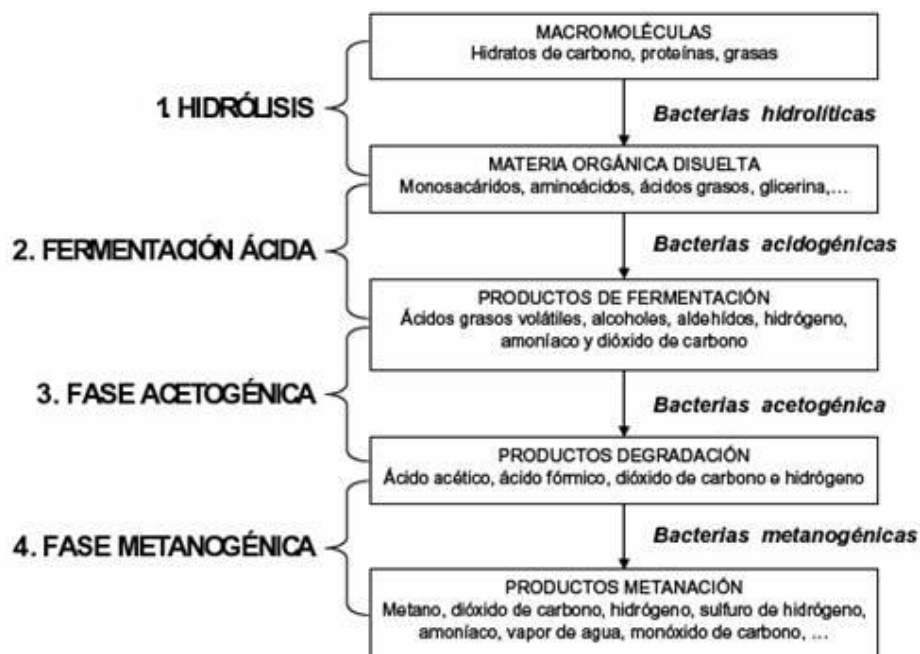


Imagen-esquema METCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales. Mc Graw Hill. 3ª Edición (1995)

1.2. Pretratamiento de lodos previo a digestión

Existe la posibilidad de integrar un proceso de pre-tratamiento del fango, anterior a la digestión anaerobia mesofílica, para mejorar la etapa de hidrólisis, pues la principal limitación del tratamiento anaerobio es la reducida solubilización de la materia orgánica suspendida.

Hay muchos tipos de pre-tratamientos, físicos, químicos, biológicos y combinados, pero en esta memoria únicamente hablaremos del pre-tratamiento físico por hidrólisis térmica.

Con la aplicación de la hidrólisis térmica en el tratamiento de lodo, la estructura interna de éste cambia. En el lodo hidrolizado se reduce la viscosidad y aumenta la biodegradabilidad, resultando un producto fácilmente digerible. Además, se ha demostrado que se consigue un incremento en la producción de biogás en el tratamiento anaerobio posterior, y a nivel industrial se reducen las necesidades de volumen de reactor.

La hidrólisis térmica rompe las paredes de las células y expone el interior de éstas a la degradación biológica. Lo consigue sometiendo al fango a unas condiciones de temperatura y presión óptimas para el proceso.

Son varias las plantas de depuración de aguas que aplican hidrólisis térmica en el proceso de tratamiento de los lodos. Esta tecnología está patentada como *Proceso Cambi*.

1.3. Aspectos positivos de la hidrólisis térmica

Según la publicación de RETEMA, *Tecnologías para maximizar la producción de biogás*, Julio 2008, de S.I. Pérez Elvira, F. Fdz-Polanco, M. Fdz-Polanco, donde se presenta una comparativa de rendimiento de las diferentes tecnologías de tratamiento del fango, se contempla que el pretratamiento por hidrólisis térmica queda muy bien posicionado en cuanto a ciertos parámetros medibles, como rotura celular, producción de biogás, influencia sobre la deshidratabilidad ó reducción de patógenos, frente a otros procesos.

En otro estudio publicado por Techno Focus, *Advanced Anaerobic Digestion – Evaluating the Options*, Marzo 2011, de Sara Isabel Pérez Elvira, en el que compara diferentes tecnologías avanzadas de digestión anaerobia para lodo mixto: Autohidrólisis, Milling, Hidrólisis Térmica y Ultrasonidos, realizado en varias plantas piloto de laboratorio, se razona que el balance de energía requerida-generada para poner en funcionamiento los sistemas estudiados, es en el caso de la hidrólisis térmica donde resulta éste positivo.

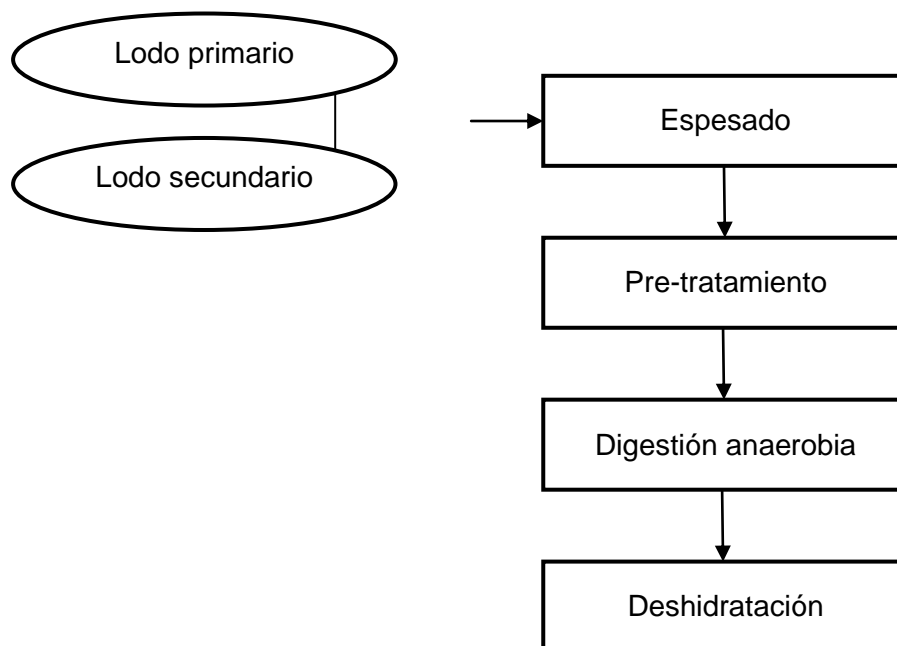
En ambos artículos, se concluye que el proceso combinado de hidrólisis térmica y digestión anaerobia es técnico-económicamente viable, además de como la alternativa más atractiva para plantas industriales:

- El aumento en la producción de biogás varía entre el 30 y el 40% para fango mixto.
- La cinética de biodegradación aumentan notablemente. Es posible trabajar con tiempos de residencia del orden de diez días.
- El lodo digerido está perfectamente higienizado.
- La viscosidad del lodo hidrolizado es mucho menor que la del lodo sin hidrolizar. Las características de agitación y mezcla en los digestores son mucho más favorables.
- La deshidratabilidad del lodo hidrolizado digerido es muy favorable, de modo que el volumen de residuo final se minimiza enormemente.
- Con concentraciones de lodo adecuadas, el proceso es energéticamente autosuficiente. La energía eléctrica en exceso producida es aprovechable.
- El proceso es económicamente viable, con tiempos de amortización inferiores a 3 años y beneficios adicionales de 300.000 €/año.

Por el contrario, como desventaja podemos apuntar que el sistema genera malos olores en el ambiente, lo que obliga a tratar las corrientes gaseosas.

El diagrama de bloques de una planta industrial sería el siguiente:

El lodo primario y el lodo secundario son productos del proceso de depuración de las aguas residuales de la planta en cuestión, y su salida de la línea de agua tiene lugar desde el sedimentador primario y el sedimentador secundario respectivamente.



El tratamiento térmico ha sido ampliamente empleado para el acondicionamiento de fango fresco, aplicándole posterior a la digestión anaerobia y anterior a la deshidratación, mejorando ésta última. Sin embargo, aplicándole en forma de pre-tratamiento, es decir, anterior a la digestión anaerobia, se favorece, entre otras cosas, la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos solubles que se generan al hidrolizar el lodo, ya sea lodo primario, secundario ó mixto, lo cual repercute también en la generación de una mayor cantidad de biogás.

Es importante tener en cuenta que la hidrólisis térmica de lodos debe ser aplicada en unas condiciones de temperatura ideales para el proceso, pues por encima de la temperatura óptima, lejos de mejorar la biodegradabilidad de la materia orgánica, se favorece la formación de compuestos recalcitrantes. El intervalo óptimo de temperatura está entre los 160°C y los 180°C (RETEMA, *Tecnologías para maximizar la producción de biogás*, Julio 2008, de S.I. Pérez Elvira, F. Fdz-Polanco, M. Fdz-Polanco.).

2. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar y comparar la biodegradabilidad anaerobia de las fracciones líquida y sólida obtenidas de la centrifugación de lodos primario y secundario, y aplicar dicha sistemática de estudio a lodo secundario pre-tratado por hidrólisis térmica.

1.2. Objetivos específicos

1- Determinar el potencial metanogénico de lodos primario y secundario, así como de las fracciones líquida y sólida de ambos obtenidas por centrifugación

2- Determinar el potencial metanogénico de lodo secundario fresco y pre-tratado térmicamente (170°C, 20 minutos) y explorar las fracciones líquida y sólida obtenidas por centrifugación

3. Metodología

3.1. Planteamiento experimental: Plan de trabajo

Se ha realizado una pequeña experimentación en el laboratorio trabajando en materia de digestión anaerobia de lodos de E.D.A.R. El trabajo está dividido en dos partes, según el objetivo analizado:

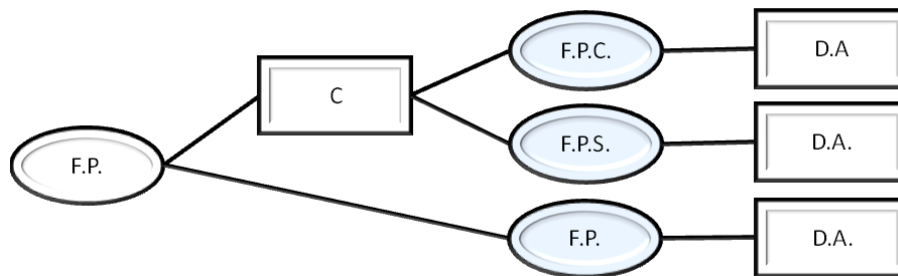
1) Se establece una comparativa entre el fango primario y el fango secundario, trabajando con ellos por separado, además de en fase fresca, separando cada uno de éstos, a su vez, en su fase líquida (sobrenadante) y su fase sólida (concentrado), para conocer el comportamiento del sustrato en condiciones anaerobias en cada uno de los

casos, en función de la cantidad de biogás que producen y el contenido en metano de ese biogás.

Como se muestra en los esquemas siguientes:

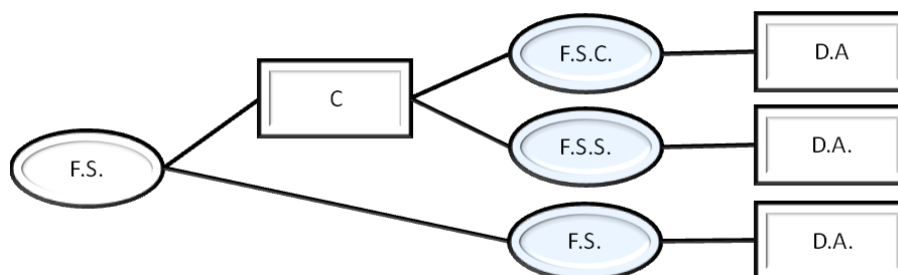
- el fango primario (F.P.) se centrifuga (C), y se obtiene el fango primario concentrado (F.P.C) y fango primario sobrenadante (F.P.S.). Las muestras se llevan a digestión anaerobia (D.A.);

Figura 1: Digestión anaerobia de fango primario



- y en el caso del fango secundario (F.S.), es el mismo proceso. Éste se centrifuga (C), se separa en fases obteniendo fango secundario concentrado (F.S.C.) y fango secundario sobrenadante (F.S.S.). El siguiente paso es la digestión anaerobia (D.A.) de las muestras.

Figura 2: Digestión anaerobia de fango secundario



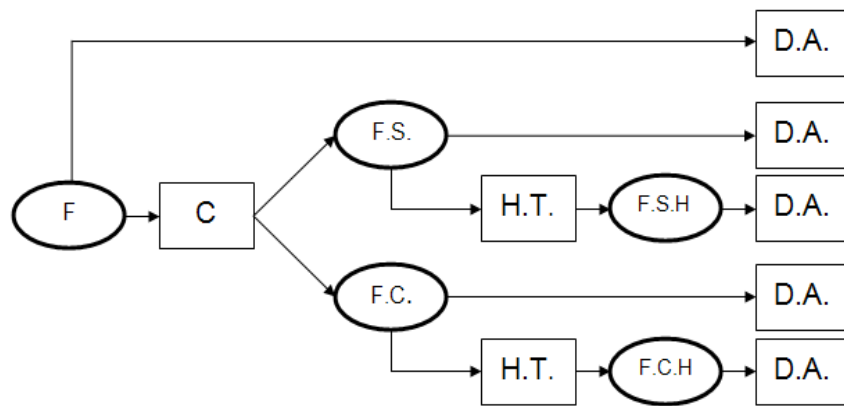
2) El siguiente paso es demostrar el efecto positivo de la hidrólisis térmica aplicada al lodo secundario de depuradora, como pretratamiento antes de la digestión anaerobia; es decir, que en un mismo lodo ha de cuantificarse una mayor producción de biogás y un mayor contenido de metano en éste biogás si le hidrolizamos que sí no. Se va a experimentar con el lodo secundario fresco y con sus fases sólida y líquida por separado, y se estudian dos posibles opciones de trabajo.

Se plantean dos alternativas: centrifugar el lodo fresco y posteriormente hidrolizar cada una de sus fases, ó directamente hidrolizar el lodo y después separarlo en fases para la digestión anaerobia.

Como se muestra en los siguientes esquemas:

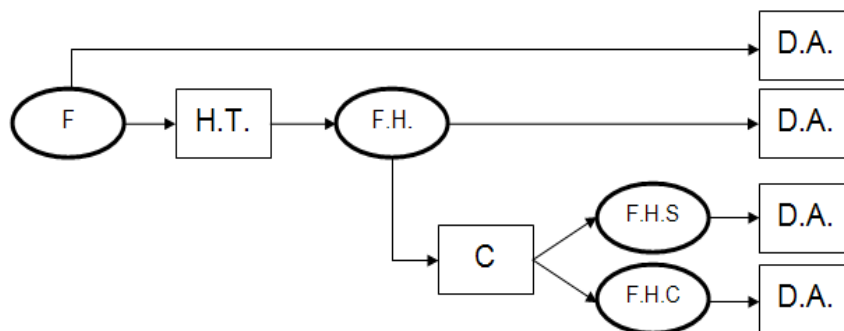
- en el primer caso, el fango secundario (F) se centrifuga (C) para obtener fango secundario sobrenadante (F.S.) y fango secundario concentrado (F.C.). Ambas fases, líquida y sólida, se hidrolizan (H.T.) y dan lugar al fango sobrenadante hidrolizado (F.S.H.) y al fango concentrado hidrolizado (F.C.H.). Todas estas muestras se llevan a digestión anaerobia (D.A.);

Figura 3: Digestión anaerobia de lodo secundario hidrolizado por fases



- y en el segundo caso, fango secundario (F) se hidroliza (H.T.), y al fango secundario hidrolizado (F.H.) se le centrifuga (C) para separarlo en fango hidrolizado sobrenadante (F.H.S.) y fango hidrolizado concentrado (F.H.C.). Todas las muestras objeto irán a digestión anaerobia (D.A.).

Figura 4: Digestión anaerobia de lodo hidrolizado antes de separar en fases



3.2. Fangos empleados

Se ha trabajado con lodo primario, lodo secundario e Inóculo traído de la E.D.A.R. de Valladolid.

Lodo primario: procedente de la decantación primaria. Se compone de material orgánico concentrado, pues es el producto que se obtiene del tratamiento primario (desgrasado, desarenado y decantación primaria) del proceso de depuración del agua residual que se lleva a cabo en la E.D.A.R.

Lodo secundario: procedente de la decantación secundaria. Se compone de material celular, es decir, es fango biológico ó bacteriano (biomasa), producto del tratamiento secundario (reactor biológico, etapa anaerobia y aerobia, y decantación secundaria) integrado en la línea que sigue el agua residual para su depuración en la E.D.A.R.

Inóculo: se compone de lodo floculento procedente del digestor anaerobio. Contiene las bacterias metanogénicas (productoras de metano).

1) Para el primero de los objetivos de la experimentación, se trabaja con lodo primario y lodo secundario, por separado. La caracterización de ambos lodos, mediante técnicas analíticas llevadas a cabo en el laboratorio, es la siguiente (Figura 1 y 2):

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
Primario (F.P.)	23,51	15,11	64,3	27.480	835	3
Secundario (F.S)	10,22	6,95	68	10.883	159	1,5

Tabla 1. Caracterización analítica del fango primario y fango secundario

Como se experimenta con las fases líquida (sobrenadante) y sólida (concentrado) de ambos lodos, es necesario centrifugarles para separar las fases. Las condiciones de centrifugado son de 6.000 r.p.m. de velocidad durante 6 minutos de tiempo. La caracterización de los productos resultantes es la siguiente:

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
Primario sobrenadante (F.P.S.)	1,29	0,56	43,4	879	835	95
Primario concentrado (F.P.C.)	154,57	100,17	64,8	137.675	-	-

Tabla 2. Caracterización analítica por fases del fango primario

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
Secundario sobrenadante (F.S.S.)	0,98	0,25	25,5	189	159	84,1
Secundario concentrado (F.S.C.)	80,11	61,92	77,3	75.451	-	

Tabla 3. Caracterización analítica por fases del fango secundario

2) Para el segundo de los objetivos planteados en el apartado anterior, se trabaja con lodo secundario y lodo secundario hidrolizado. Con la hidrólisis del fango se consigue aumentar el % de DQOs de forma significativa.

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
Fango secundario (F)	8,02	5,56	69,3	8.651	66	0,8
Fango S. hidrolizado (F.H.)	3,17	2,24	70,7%	2.931	1.705	58,2%

Tabla 4. Caracterización analítica de fango secundario fresco e hidrolizado

Centrifugando el fango secundario fresco se separa la fase líquida de la sólida, para poder hidrolizar cada una de ellas por separado. Las condiciones de centrifugado son de 6.000 r.p.m. de velocidad durante 6 minutos de tiempo, y las condiciones de hidrólisis térmica son de 170°C de temperatura a 8 bares de presión durante 20 minutos de tiempo (Figura 3).

La hidrólisis mejora la solubilidad de los sólidos:

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQO
Fango líquido (F.S.)	0,93	0,19	20,4	151	63,00	41,7
Fango sólido (F.C.)	82,09	61,00	74,3	101.262	-	

Tabla 5. Caracterización analítica de fango secundario separado en fases

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
F. líquido hidrolizado (F.S.H.)	0,55	0,26	47,3	342	263	76,9
F. sólido hidrolizado (F.C.H.)	40,3	29,95	74,3	44.478	4.275	9,6

Tabla 6. Caracterización analítica de fango secundario hidrolizado por fases

Si centrifugamos el lodo ya hidrolizado (en las mismas condiciones de centrifugado y de hidrólisis que en el caso anterior), obtenemos el sobrenadante y el concentrado de este lodo hidrolizado (Figura 4).

Tipo de lodo	ST (g/L)	SV (g/L)	%SV	DQO _t (mg/L)	DQO _s (mg/L)	%DQOs
F. hidrolizado líquido (F.H.S.)	1,8	1,44	80%	1.786	1.705	95,5%
F. hidrolizado sólido (F.H.C.)	177,36	104,7	59%	131.279	-	-

Tabla 7. Caracterización analítica de las fases de fango secundario hidrolizado

3.3. Ensayos de biodegradabilidad

Estudiamos la biodegradabilidad del lodo fresco y el lodo hidrolizado mediante test anaerobios.

Un test anaerobio consiste en una serie de botes de vidrio contenedores de sustrato más inóculo, colocados en un agitador que funciona continuamente, que ha

de mantenerse en la cámara caliente a 35°C asegurando así las condiciones mesófilicas necesarias.

Los elementos principales para el montaje son:

- Frascos de vidrio transparente de 300 ml de capacidad
- Septum de caucho 40
- Tapón con agujero de caucho rosca 40
- Medidor de presión, que mide en un rango de presión de 0-1000 mbar
- Aguja de jeringa

Según la cantidad de sólidos volátiles de cada muestra objeto y de los del inóculo utilizado, y teniendo en cuenta que la *Relación Sustrato/Inóculo* es de 0,5, se calcula la cantidad de sustrato y de inóculo que añadir en cada uno de los frascos digestores, para el montaje de los ensayos de biodegradabilidad. De los 300 ml de capacidad de los botes reactor, 200 ml son sustrato más inóculo y 100 ml son de cámara de aire.

El inóculo es lodo floculento del digestor anaerobio de la E.D.A.R. de Valladolid. En él se adiciona los nutrientes necesarios para que se lleve a cabo la digestión anaerobia en los reactores sin ningún tipo de déficit. Se añade 1ml/L de macronutrientes, 1ml/L de micronutrientes, 5g/L de NaHCO₃ y una pequeña piedra de Na₂S.9H₂O.

El ensayo de biodegradabilidad requiere un seguimiento durante un tiempo aproximado de 30 días, en lo que la presión del digestor, y por tanto la producción de biogás, se estabiliza.

El seguimiento de la producción de biogás se mide mediante técnicas manométricas, midiendo la presión desde la parte de arriba del reactor. Las lecturas de presión se obtienen colocando una aguja en el medidor de presión, e insertando ésta en el septum de los digestores. Los valores de presión obtenidos se relacionan directamente con la producción de biogás.

3.4. Técnicas analíticas

Los parámetros analíticos de interés para el seguimiento de test anaerobio son:

- Materia orgánica total y soluble
- Sólidos totales y sólidos volátiles
- Cantidad de biogás y metano, y proporción de metano en el biogás

La determinación de estos parámetros se realiza en el laboratorio, siguiendo las técnicas analíticas propuestas en el APHA-AWWA-WPCF 2005, *Standard Methods for the Examination of the water and wastewater*, 21 st Edition.

✓ Demanda química de oxígeno (DQO); es la cantidad de oxígeno consumido durante el proceso de oxidación química de la materia orgánica (biodegradable y no biodegradable) presente en la muestra. Se expresa en mg O₂/l.

La muestra se lleva a ebullición con reflujo en presencia de sulfato de mercurio (II), HgSO₄, de una cantidad conocida de dicromato potásico, (K₂Cr₂O₇), y de un catalizador de plata, Ag₂SO₄, en medio fuertemente acidificado por ácido sulfúrico, (H₂SO₄), durante 2 horas a 150°C. Después de la digestión, el dicromato no reducido se determina por valoración con sulfato de amonio ferroso, Fe(NH₄)₂SO₄·6H₂O). El valor de la DQO se determina a partir del dicromato reducido, el equivalente a la cantidad de materia oxidada.

La DQO se puede analizar como DQO total ó soluble. La DQO soluble corresponde a la muestra filtrada (filtros AP40).

✓ DQO sólidos; Es el mismo método que para la DQO, únicamente que el volumen de muestra es de 1 a 1,5 g y se añade 10 ml de agua para diluir. Además en este caso, varía la cantidad de solución digestora y de solución catalítica que añadir a la muestra antes de ponerlo a enfriar 2 horas.

✓ Sólidos totales (ST) y Sólidos volátiles (SV); los sólidos totales es el residuo que permanece en la cápsula después de la evaporación de la muestra de volumen conocido y posterior secado en una estufa a 103 - 105°C durante 24 horas.

Los sólidos volátiles son la porción del residuo total que se pierde por calcinación a 500 ± 50°C, para ello la cápsula se deposita en un horno mufla durante un tiempo de 24 horas.

El volumen de la muestra será de entre 25 – 50 gramos para muestras líquidas y de entre 25 – 30 gramos para muestras sólidas.

Ambos, ST y SV, se expresan en mg/L.

✓ Análisis de la composición del gas; mediante cromatografía de gases, se determina la composición del biogás. Utilizamos un cromatógrafo Varian CP-3800 que nos aporta la composición en % de CH₄, H₂S y CO₂ (biogás), O₂ y N₂ (aire) de cada muestra.

La muestra la recogemos e inyectamos manualmente, con una jeringuilla Hamilton que recoge 100 µL de muestra. Pinchamos en el septum del frasco reactor para recoger el gas e inyectamos ese gas por el septum del cromatógrafo.

3.5. Parámetros de respuesta

Para la parte experimental, utilizamos una serie de parámetros medibles:

Calculamos en que porcentaje se ha degradado la materia orgánica en la digestión anaerobia de las muestras, tanto en las que se aplico hidrólisis como en las que no:

- Biodegradabilidad;

$$BD\% = \frac{mL CH_4/g SV_{alim}}{350 * DQO_t/SV}$$

Para la parte experimental con hidrólisis térmica, además valoramos también otro tipo de parámetros, que cuantifiquen la eficacia del pretratamiento previo a la digestión anaerobia:

- Factor de solubilización;

$$F.S = \frac{DQO_s \text{ hidrolizado} - DQO_s \text{ normal}}{(DQO_t - DQO_s)_{normal} * 100}$$

- Factor de desintegración;

$$F.D = \frac{(ml CH_4/DQO_{alim.})_{hidrolizada} - (ml CH_4/DQO_{alim.})_{normal}}{(ml CH_4/DQO_{alim.})_{normal} * DQO_{particulada}}$$

4. Resultados y discusión

Objetivo 1: Potencial metanogénico de lodos primario y secundario, así como de las fracciones líquida y sólida de ambos obtenidas por centrifugación:

Se ha realizado un primer ensayo de biodegradabilidad, con lodo primario y lodo secundario por separado y por fases. A continuación, se exponen una serie de gráficas (1, 2, 3 y 4), en las que podemos observar el comportamiento de ambos lodos y de sus fases, representados por la cantidad de biogás y de metano que generan por g de SV alimentado (sustrato) en función del tiempo.

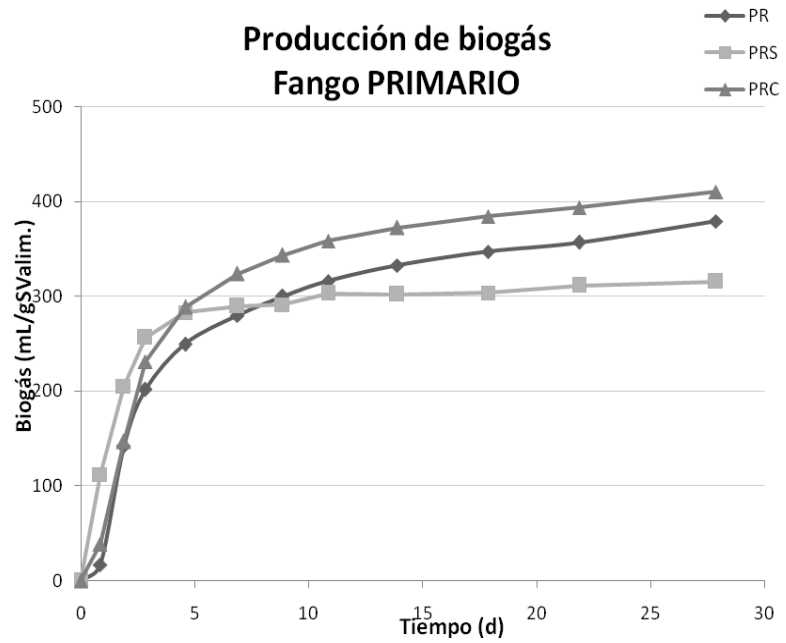
La biodegradabilidad de los diferentes fangos en su fase fresca, sin modificar su composición íntegra, es muy similar (Tablas 8 y 9), pero si los dividimos en fases, en el primario funciona mucho mejor el tratamiento anaerobio.

Lodo primario

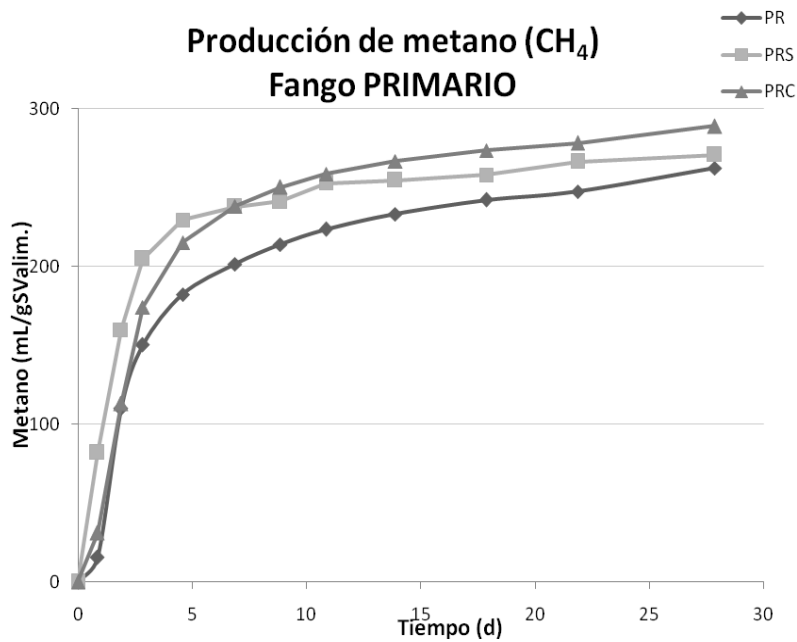
Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim}
Primario (PR)	1,82	41%	262
Primario sobrenadante (PRS)	1,57	49%	271
Primario concentrado (PRC)	1,37	60%	289

Tabla 8. Resultados del test anaerobio para fango primario y sus fases

PR = F. Primario
 PRS = F. Primario
 sobrenadante
 PRC = F. Primario
 concentrado



Gráfica 1. Producción de biogás en la D.A de fango primario



Gráfica 2. Producción de metano en la D.A de fango primario

En el caso del fango primario, la producción de biogás de su fase concentrada está por encima de la del propio fango fresco y de la de su fase sobrenadante, con una diferencia de 31,1 ml/g SV alim y de 95 ml/g SV alim respectivamente.

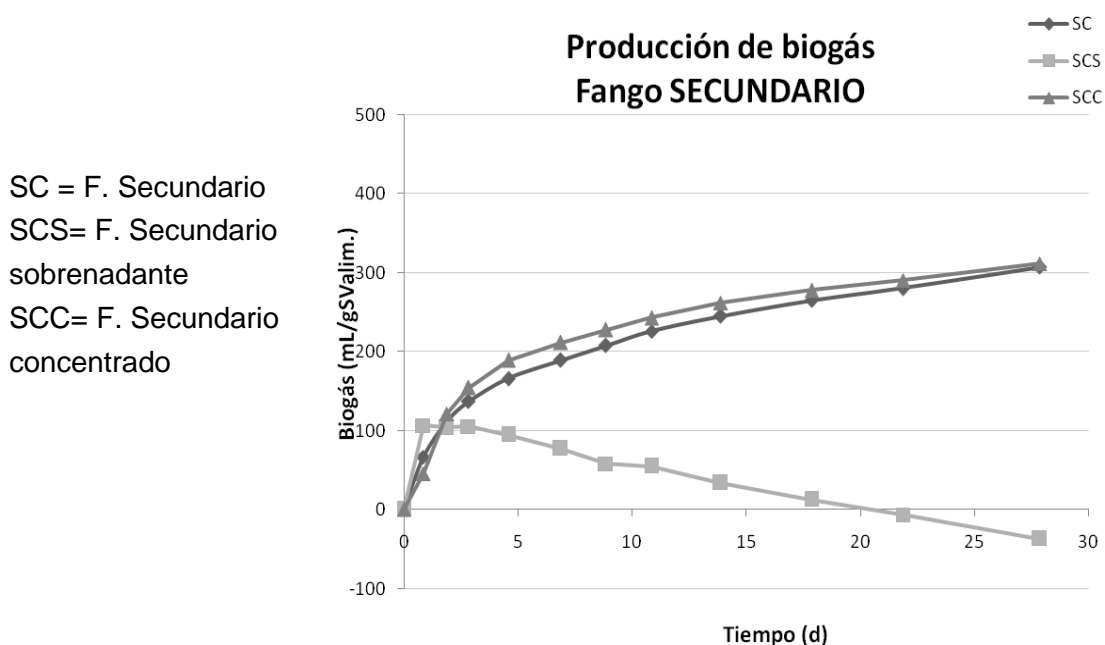
Esta fase sólida, también resulta ser la que mayor porcentaje de degradación de la materia orgánica alcanza, un 60%, y por lo tanto, la que más metano genera con 289 ml/SValim.

Sin embargo, en lo que respecta a la producción de metano, la diferencia entre las tres muestras disminuye (Gráfica 2), debido a las variaciones en el porcentaje de este elemento en la composición del biogás, pues en la muestra líquida se alcanzan porcentajes entre el 73-82% mientras que las muestras fresca y concentrada varían en torno al 65-75%.

Lodo secundario

En la cuantificación del biogás por parte del lodo secundario y sus fases sólida y líquida, observamos que mientras que la diferencia entre el fango concentrado y el fango fresco es mínima, en torno a 4,7 ml/g SValim., la diferencia de ambas con la fase líquida o sobrenadante es extrema.

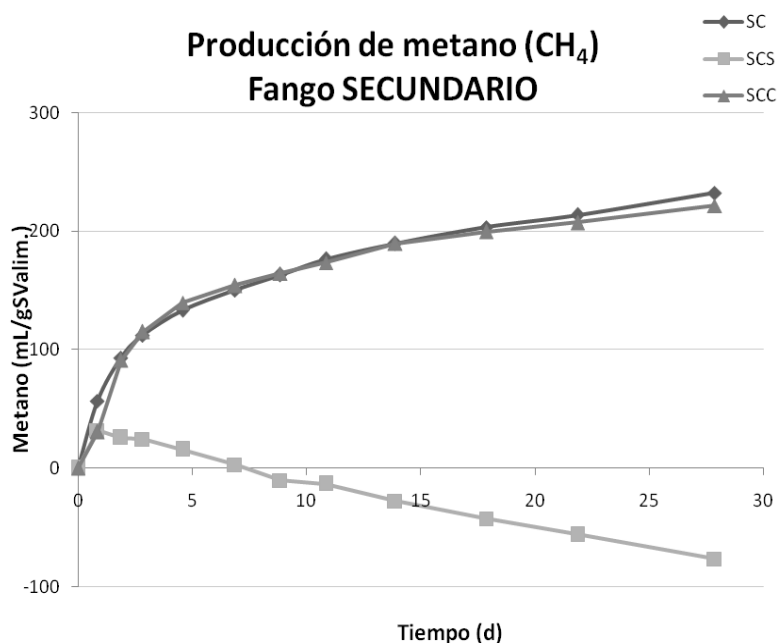
Presenciamos valores negativos de producción en el transcurso de la fase líquida, pues a partir del día 20 ese reactor deja de producir biogás y es el inóculo quién sigue generando energía.



Gráfica 3. Producción de biogás en la D.A de fango secundario

La gráfica de producción de metano es similar a la de producción de biogas, sólo que en este caso, la producción de metano en el sobrenadante deja de ser efectiva mucho antes, entre el día 7-8 ya se evidencia la presencia del inóculo únicamente.

Por lo que respecta a los porcentajes de metano en la composición del biogás, al contrario que en el caso del fango primario, en éste la muestra líquida logra los valores mas bajos, 41-67%, la muestra concentrada se mantiene mas o menos estable alrededor del 68% y los mejores resultados se dan en el fango fresco, 70-79%.

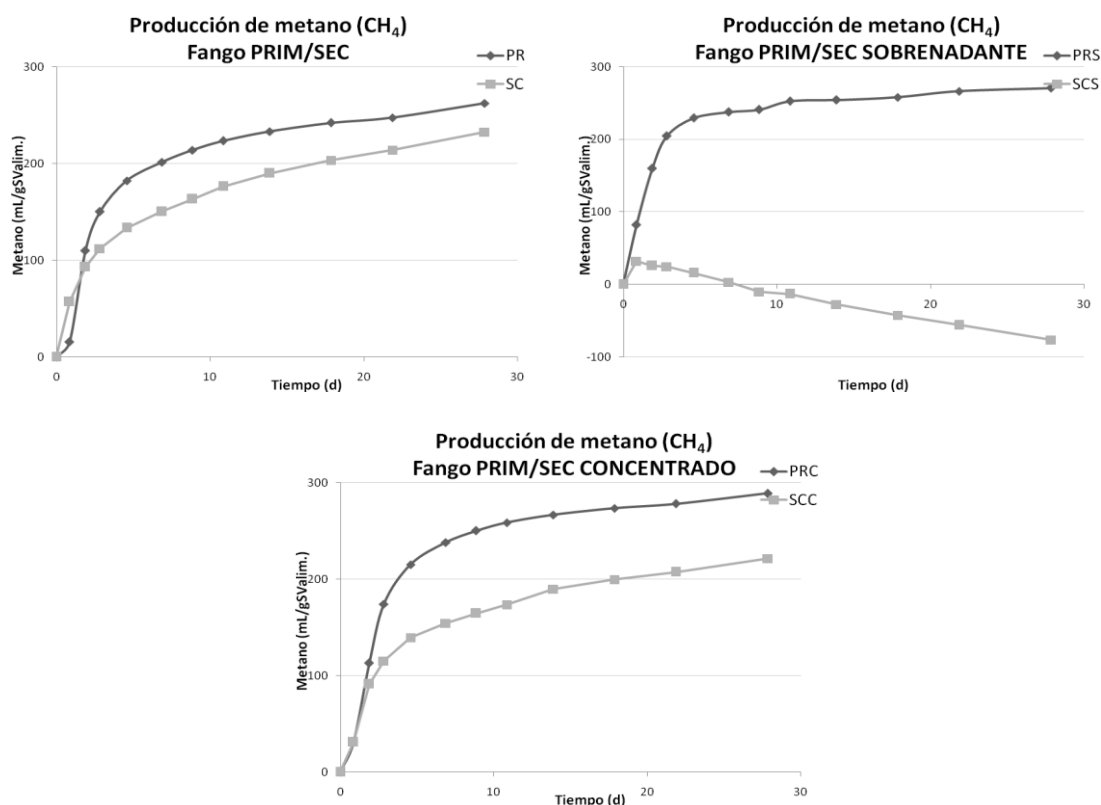


Gráfica 4. Producción de metano en la D.A de fango secundario

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim.}
Secundario (SC)	1,57	42%	232
Secundario sobrenadante (SCS)	0,76	-29%	-77
Secundario concentrado (SCC)	1,22	52%	221

Tabla 9. Resultados del test anaerobio para fango secundario y sus fases

Comparativa entre lodo primario y secundario



Gráfica 5. Comparación de la producción de metano de la D.A de fango primario y secundario

Ambos lodos, primario y secundario, se biodegradan en torno a un 40%, valor teórico típico de digestión anaerobia de lodos. Sin embargo, si les separamos en fases, la biodegradabilidad es mayor en las del lodo primario respecto al secundario, y la producción de metano también. La mayor diferencia está entre las fases sobrenadantes, ya que el resto de muestras varía de forma más moderada.

Esto puede deberse a la diferente composición primaria de ambos lodos en sí, pues en el lodo primario normalmente hay mayor cantidad de lípidos, mientras que en el lodo secundario abundan los carbohidratos no fácilmente degradables y las proteínas accesibles a degradarse cuando la pared celular se rompe. (Tesis Doctoral *Desarrollo de procesos de hidrólisis térmica para la minimización de lodos de E.D.A.R.*, Universidad de Valladolid, Sara Isabel Pérez Elvira).

Para finalizar el análisis de esta parte, se puede afirmar que en las condiciones de nuestro ensayo y para el tipo de lodo que hemos utilizado, se ha obtenido unos resultados notablemente más favorables en la digestión anaerobia del fango primario respecto a la del secundario.

Objetivo 2: Potencial metanogénico de lodo secundario fresco y pre-tratado térmicamente (170°C, 15 minutos) y de las fracciones líquida y sólida obtenidas por centrifugación:

Se ha realizado un segundo ensayo de biodegradabilidad, en el que se ha experimentado con hidrólisis térmica de lodo secundario. Las condiciones de montaje fueron las mismas que en el anterior.

Lodo secundario

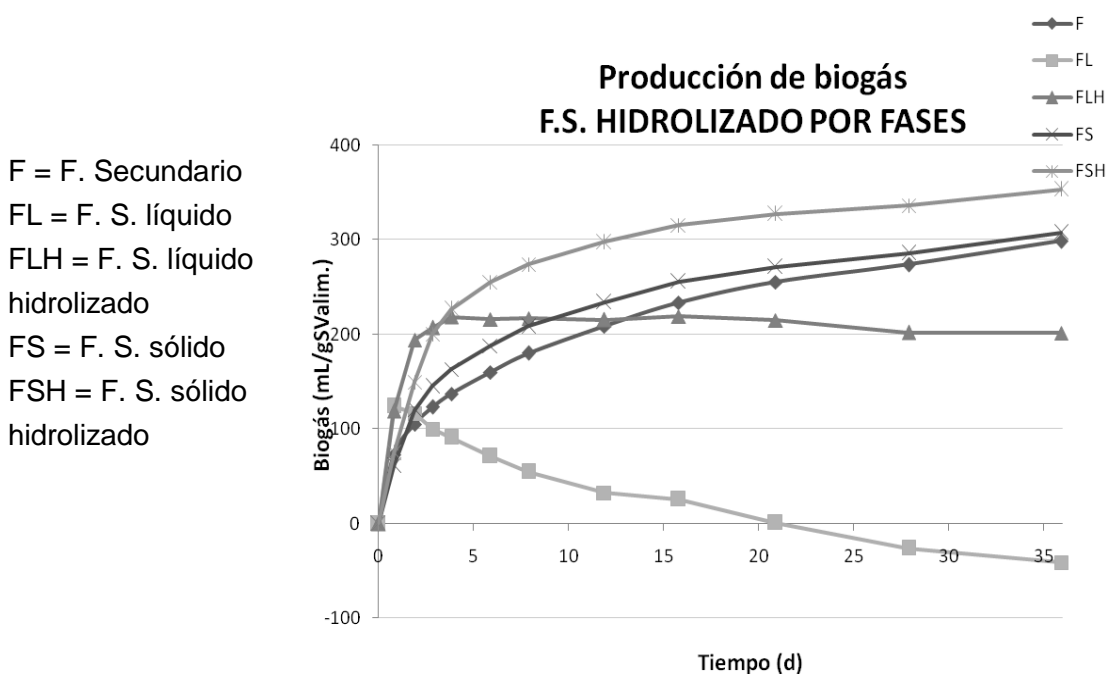
Como para el estudio anterior, el lodo procede del sedimentador biológico de la misma estación depuradora, y como se observa varía poco respecto al anterior:

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim}
F. Secundario (F)	1,56	40%	220

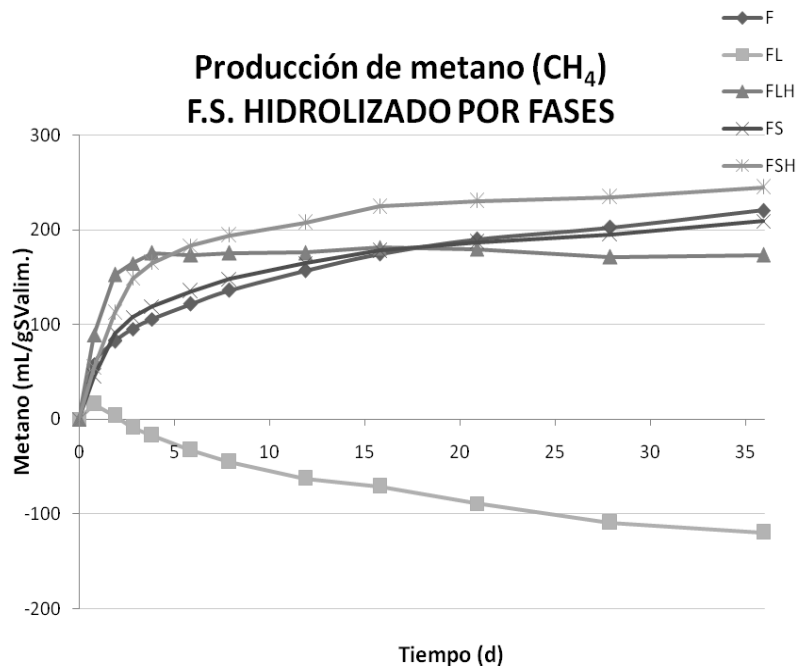
Tabla 10. Resultados del test anaerobio para fango secundario

1) Por un lado, el lodo se separa en fases, centrifugando de la misma manera que para el primer test anaerobio, y las fases resultantes se hidrolizan para conocer el efecto de mejora en la biodegradabilidad. Las condiciones de hidrólisis se especifican en el apartado de Metodología.

Las gráficas 6 y 7 son los resultados obtenidos de esta primera parte del ensayo de lodo hidrolizado por fases.



Gráfica 6. Producción de biogás de lodo secundario hidrolizado por fases



Gráfica 7. Producción de metano de lodo secundario hidrolizado por fases

En este caso, volvemos a obtener una parte sobrendante que nos genera valores negativos, es decir, como en el ensayo de biodegradabilidad anterior, la producción de biogás va decayendo hasta que aproximadamente a los 20-22 días es el inóculo quien mantiene la producción de energía en ese reactor.

Lo más relevante de esta parte del estudio, es que si al fango líquido se le aplica un pretratamiento de hidrólisis térmica previo a la digestión anaerobia, conseguimos mejorar la producción de biogás de éste significativamente, de 0 a 201,4 ml/g SValim al final del ensayo (FL-FLH). La proporción de SV crece de un 20,4% a un 47,3% de una muestra a otra. Es posible, que el tratamiento térmico provoque que cierto material celular susceptible de producir metano se solubilice.

El fango sólido también mejora su biodegradabilidad con el tratamiento de hidrólisis, pero de forma más moderada, en torno a un 10%, que equivale a una diferencia en la producción de 45,7 ml/g SValim.

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim}
F.S. Líquido (FL)	0,79	-43,1%	-120
F.S. Líquido hidrolizado (FLH)	1,32	38%	173

Tabla 11. Resultados del test anaerobio para las fases del f. secundario

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SValim
F.S. Sólido (FS)	1,66	36%	209
F.S. Sólido hidrolizado	1,49	47%	245

Tabla 12. Resultados del test anaerobio para las fases hidrolizadas del f. secundario

En cuanto a la producción de metano, se mantienen las mismas proporciones que en la gráfica de producción de biogás. Mientras que la muestra líquida entre el 2-3 día deja de generar valores positivos de metano, la misma muestra sometida a hidrólisis alcanza un rendimiento de hasta 173 ml/g SValim al final del test anaerobio, aunque su producción máxima la obtuvo el día 16 con 181 ml/g SValim.

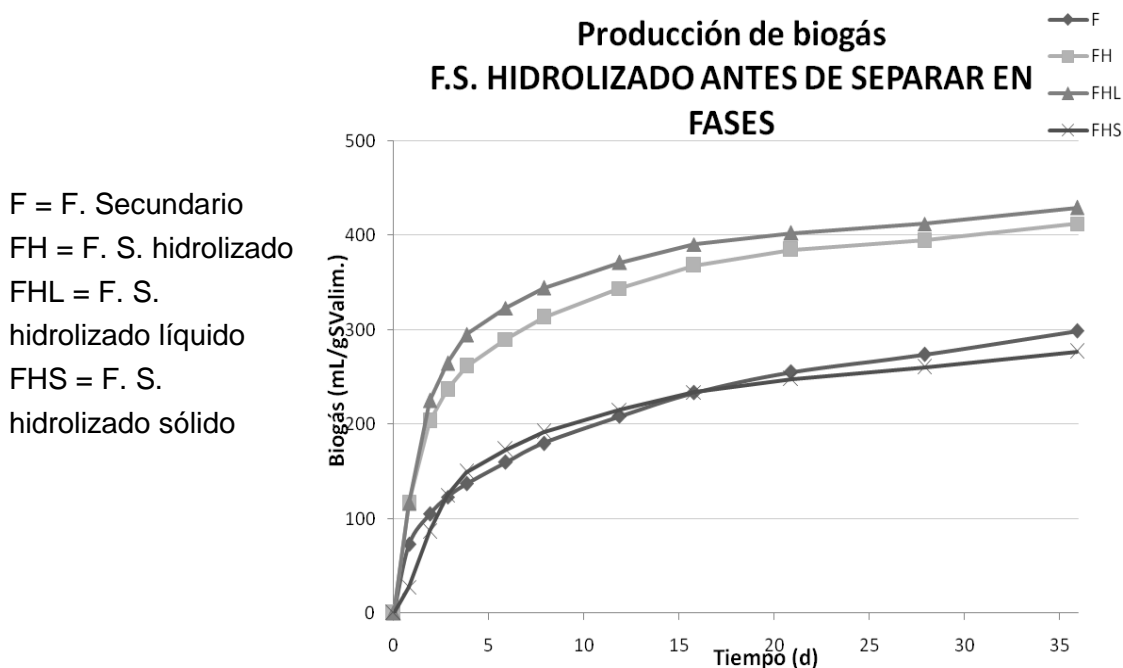
En cuanto al porcentaje de metano en la composición del biogás, también es este sobrenadante hidrolizado quién logra los mayores valores, 73-84%, mientras que sin pretratamiento se mueve en 20-65%.

	F - FH	FL - FLH	FS - FSH
FS%	58	60	10
FD%	78	-	31

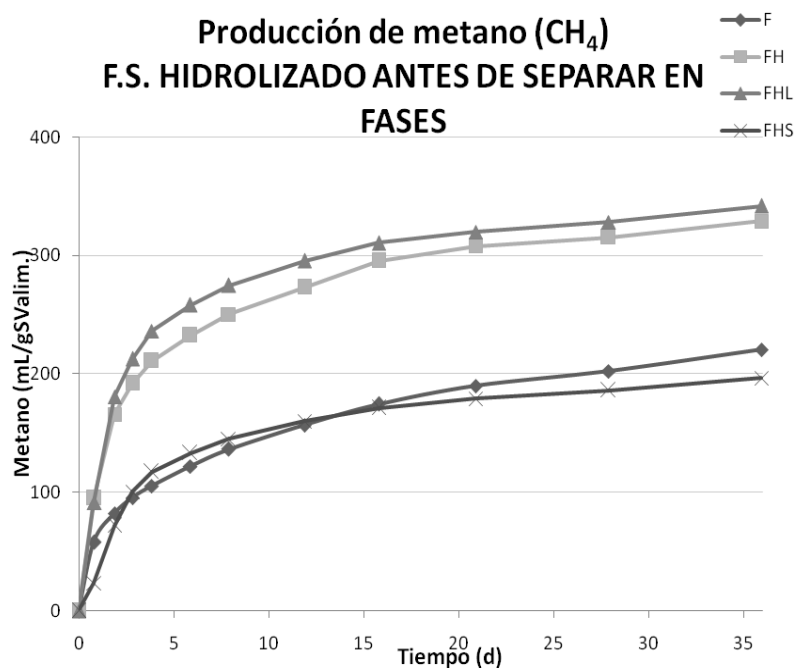
Tabla 13. Parámetros de medida para hidrólisis térmica

En la tabla anterior, se han calculado el factor de solubilización y de desintegración de las muestras hidrolizadas respecto a las que no. La muestra sólida es la que menos se solubiliza mientras que la muestra líquida la que más pero seguida muy de cerca del fango secundario en fase fresca. De ahí que realizar hidrólisis por fases únicamente para maximizar la producción de energía puede no considerarse una opción práctica.

2) Por otro lado, se experimenta hidrolizando el lodo fresco directamente, y una vez que tenemos el lodo hidrolizado, le separamos en sus fases sobrenadante y concentrado. Para el análisis de esta parte del ensayo, se estudiara las gráficas 8 y 9, la producción de biogás y metano en cada caso:



Gráfica 8. Producción de biogás de f.s. hidrolizado antes de separado en fases



Gráfica 8. Producción de metano de lodo secundario hidrolizado antes de separar en fases

Se percibe de la gráfica 7 que la mayor producción de biogas generada está en el propio fango secundario hidrolizado, con 329 ml/g SValim, y en centrifugar éste y obtener su sobrenadante para digerir, con 342 ml/g SValim, pues ambas producciones son muy similares. Podría decirse que, al hidrolizar el lodo secundario estamos rompiendo el material celular con potencial metanogénico, los sólidos productores de metano se solubilizan, y con el centrifugado posterior del lodo hidrolizado, éstos sólidos pasan a formar parte de la fase líquida.

Por otro lado, se ve que la fase solida del lodo ya hidrolizado se iguala en producción al fango fresco en sí, sin ningún tipo de tratamiento, es decir, que por esa parte esta opción tampoco supone ninguna mejora en la producción de biogas

La producción de metano (Gráfica 8) sigue la misma dinámica que la producción de biogas, y además en todas las muestras se aprecian buenos resultados de porcentaje de metano, variando entre del 67 al 76%.

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim}
F. S. hidrolizado (FH)	1,31	72%	329

Tabla 14. Resultados del test anaerobio para el f. secundario hidrolizado

Tipo de lodo	g DQO/g SV	BD	ml CH ₄ /g SV _{alim}
F.S. hidrolizado líquido (FHL)	1,24	79%	342
F.S. hidrolizado sólido (FHS)	1,25	45%	197

Tabla 15. Resultados del test anaerobio para las fases del fango hidrolizado

5. Conclusiones

1) Sobre la digestión anaerobia de fango primario ó fango secundario por separado, es más recomendable en el caso del fango primario, se biodegrada mejor resultando una mayor producción de metano. Si lo separamos por fases para digerirlo, también los resultados son significativamente más favorables para este tipo de fango.

2) Hidrolizar el lodo secundario mejora su biodegradabilidad de forma muy significativa, un 32%. Si aplicamos el pretratamiento por fases, vemos que dónde se experimenta el cambio más relevante es en la fase del sobrenadante, que pasa de no producir nada con el tratamiento anaerobio a producir hasta un máximo de 181 mL/g SValim. con el tratamiento combinado hidrólisis más digestión anaerobia.

3) La separación en fases después de hidrolizar el lodo carece de sentido, pues del análisis de las gráficas vemos que no varía de forma significativa digerir el lodo hidrolizado de su fase sobrenadante únicamente.

4) Por último, la producción de metano de lodo hidrolizado está por encima de la generada por la digestión de cualquiera de sus fases, líquida y sólida, hidrolizadas, por lo cual, ese es el tratamiento adecuado para maximizar la obtención de energía.

6. Líneas futuras

En líneas generales, del estudio se concluye lo expuesto en el apartado anterior, aunque bien es verdad, que dicho estudio se presta a una posible discusión de las conclusiones estipuladas anteriormente.

Una posible vía por donde seguir este estudio planteado anteriormente, es completar los resultados experimentales con los balances de materia de cada una de las muestras, para ver la contribución real de las fracciones experimentadas. Conociendo la materia de entrada y salida antes y después del tratamiento de digestión anaerobia se puede calcular una comparativa más verídica que nos aporte conclusiones más específicas.

7. Agradecimientos

Gracias al Dto de Ing. Química y Tecnología Medioambiental, GIR Tecnología Ambiental, de la Universidad de Valladolid, por los medios prestados para poder realizar mi trabajo fin de máster mediante experimentación.

Especial mención a Ieva Sapkaite, estudiante de Doctorado del grupo GIR Tecnología Ambiental, por su colaboración y apoyo técnico con la metodología del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

En materia de digestión anaerobia:

METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales*. Mc Graw Hill. 3ª Edición (1995)

En materia de hidrólisis térmica:

Publicación de RETEMA, *Tecnologías para maximizar la producción de biogás*, Julio 2008, de S.I. Pérez Elvira, F. Fdz-Polanco, M. Fdz-Polanco

Estudio de Techno Focus, *Advanced Anaerobic Digestion – Evaluating the Options*, Marzo 2011, de Sara Isabel Pérez Elvira

En materia de digestión anaerobia de lodos y tratamiento de hidrólisis:

Tesis Doctoral *Desarrollo de procesos de hidrólisis térmica para la minimización de lodos de E.D.A.R.*, Universidad de Valladolid, Sara Isabel Pérez Elvira

Para las técnicas analíticas realizadas en el laboratorio:

Standard Methods for the Examination of the water and wastewater, 21 st Edition, APHA-AWWA-WPCF 2005,

Métodos normalizados APHA-AWWA-WPCF

Norma UNE 77004:2002