

**VALORIZACIÓN DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES**

AUTORES

DANIELA CARDONA MEJÍA

NATALIA OROZCO ALZATE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MANIZALES

2018

**VALORIZACIÓN DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES**

AUTORES

**DANIELA CARDONA MEJÍA
NATALIA OROZCO ALZATE**

TUTOR

JAVIER MAURICIO NARANJO VASCO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR ALTÍTULO DE INGENIERAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

INGENIERÍA AMBIENTAL

MANIZALES

2018

DEDICATORIA

A nuestras familias, por la confianza y motivación que nos han brindado y a Dios, por acompañarnos y darnos fortaleza y sabiduría en todo este proceso que ya ha culminado.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro docente tutor e Ingeniero Javier Mauricio Naranjo, por su dedicación, orientación y recomendaciones oportunas para el mejoramiento continuo de nuestro trabajo y a el Ingeniero Juan David Espitia, por su colaboración en el aporte de la información que requerimos para la elaboración del documento

1. TABLA DE CONTENIDO

1.	TABLA DE CONTENIDO	5
2.	TABLA DE TABLAS	7
3.	TABLA DE FIGURAS.....	8
4.	RESUMEN.....	9
5.	ABSTRACT	10
6.	INTRODUCCIÓN.....	11
7.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
8.	JUSTIFICACIÓN	13
9.	OBJETIVOS	14
9.1	OBJETIVO GENERAL	14
9.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
10.	GENERALIDADES.....	15
10.1	¿QUÉ ES UN LODO RESIDUAL?.....	15
10.2	CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS	17
10.3	¿QUÉ ES UN BIOSÓLIDO?.....	18
10.4	CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN COLOMBIA	20
10.5	NORMATIVIDAD SOBRE LODOS Y BIOSÓLIDOS	21
11.	TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN DE LODOS.....	25
11.1	AGRÍCOLA Y FORESTAL.....	25
11.2	FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y/O CERÁMICA	26
11.3	GASIFICACIÓN POR LECHO FLUIDIZADO	27
11.4	RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	28
11.5	UTILIZACIÓN DE CENIZAS COMO SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO FINO EN BLOQUES DE HORMIGÓN PREFABRICADOS.....	28
11.6	INCINERACIÓN	28
12.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGIAS DE VALORIZACIÓN	29
13.	FACTORES DE COMPARACIÓN.....	35
14.	TIPOS DE ESPESAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS.....	36
14.1	ESPESAMIENTO	36
15.	ESTABILIZACIÓN.....	37

15.1 ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA.....	37
15.1.1 ESTABILIZACIÓN AERÓBICA	37
15.1.2 ESTABILIZACIÓN AERÓBICA TERMÓFILA.....	38
15.1.3 COMPOSTAJE	38
15.1.4 ESTABILIZACIÓN ANAERÓBICA	38
15.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA.....	39
15.2.1 ESTABILIZACIÓN CON CAL.....	39
16. HIDRÓLISIS TÉRMICA, PRETRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS.....	40
16.1 TECNOLOGÍAS COMERCIALES.....	41
17. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS.....	44
18. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LODOS A PARTIR DE INCINERACIÓN	44
19. DIGESTIÓN ANAEROBIA	49
19.1 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO	51
19.2 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	53
19.3 PRODUCCIÓN DE BIOGAS	54
19.4 USOS DEL BIOGAS	55
19.5 REQUERIMIENTOS DE TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DEL USO.....	57
19.6 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE INVERSIÓN Y ENERGÍA ELÉCTRICA ANUAL	59
19.7 ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO MEDIO DEL DIGESTOR DE LODO.....	59
20. ESQUEMA QUE SE PROPONE	60
21. CONCLUSIONES.....	60
22. BIBLIOGRAFÍA.....	61

2. TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de diferentes tipos de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas.	16
Tabla 2. Diferencias en la composición de un lodo crudo y un biosólido.	19
Tabla 3. Comparación de algunos parámetros de biosólidos que se producen en las principales PTAR urbanas de Colombia.	20
Tabla 4. Límites de concentración de metales pesados permitidos en los biosólidos en diferentes países.	21
Tabla 5. Resumen marco legal lodos generados en PTAR y biosólidos.	22
Tabla 6. Valores máximos permisibles de microorganismos en biosólidos.	23
Tabla 7. Valores máximos permisibles de metales pesados en biosólidos.	24
Tabla 8. Ventajas y desventajas de las tecnologías de valorización.	29
Tabla 9. Factores de comparación.	35
Tabla 10. Etapas de la hidrólisis.	40
Tabla 11. Ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica.	41
Tabla 12. Contenido en cenizas de los lodos en base seca y en base húmeda.	49
Tabla 13. Dato medio de la humedad, PCI (smh), PCI (sms) de cada lodo.	49
Tabla 14. Componentes del biogás en función del substrato utilizado.	55
Tabla 15. Estimación del coste de inversión y energía eléctrica anual.	59
Tabla 16. Estimación del presupuesto medio del digestor de lodo.	59

3. TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una depuradora de aguas residuales. Fuente: CELAN - Centro de Estudios Locales de Andorra. http://www.celandigital.com/25/index.php/brujula-afondo/medio-ambiente/edar (4).	15
Figura 2. Horno de pisos múltiples.	46
Figura 3. Horno de lecho fluidizado.	46
Figura 4. Vista general del incinerador de lodos y tratamiento de humos con aprovechamiento de energía. Fuente: http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/Palacios.pdf	47
Figura 5. Representación gráfica del procedimiento de incineración para lodos digeridos procedentes de una PTAR. Fuente: http://www.aepro.com/files/congresos/2009badajoz/ciip09_1003_1014.2534.pdf (24)	48
Figura 6. Descripción del proceso de digestión anaerobia.	50
Figura 7. Proceso de la digestión anaerobia.....	51
Figura 8. Etapas de la digestión anaerobia.....	52
Figura 9. Usos del biogás.	56
Figura 10. Requerimientos de tratamiento del biogás en función del uso.	58
Figura 11. Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación.	58
Figura 12. Esquema propuesto.....	60

4. RESUMEN

Este proyecto está enfocado en una investigación bibliográfica sobre tecnologías y alternativas que puedan ser implementadas en la valorización de los lodos que se generan en una Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal. Esta revisión pretende recolectar información que nos permita determinar y analizar cuáles son las mejores tecnologías que puedan adaptarse para el tratamiento de los lodos en la ciudad de Manizales, teniendo en cuenta criterios base como: ventajas, desventajas, costos, eficiencias, rendimientos, complejidad, normativa y aspectos técnicos.

PALABRAS CLAVE

Lodos, valorización, Planta de Tratamiento de Agua Residual.

5. ABSTRACT

This project is focused on a bibliographical research on technologies and alternatives that have implementations in the valorization of the residues that are generated in a Municipal Wastewater Treatment Plant. This review aims to collect information that allows us to determine and analyze the best technologies that are adapted for the treatment of sludge in the city of Manizales, taking into account criteria such as: advantages, disadvantages, costs, efficiencies, yields, normative technicians and technical experts.

KEYWORDS

Sludge, recovery, Wastewater Treatment Plant.

6. INTRODUCCIÓN

Los lodos residuales, son sólidos que provienen del proceso de tratamiento de las aguas residuales, los cuales son removidos para que el agua pueda descontaminarse y así pueda ser reutilizada. Estos lodos deben ser tratados para desecharlos o transformarlos, con el fin de reducir el impacto que sus elementos contaminantes puedan causar a la salud de los seres vivos y al medio ambiente. Por ello, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales no solo contemplen cómo tratar el agua sino también deben pensar en qué hacer con los lodos residuales generados **(1)**.

Según Rojas & Mendoza (2012), aunque en los países en vías de desarrollo no se tienen controles estrictos sobre el manejo y disposición de los lodos residuales generados, se han realizado proyectos de investigación que implican el análisis de calidad de lodos y elaboración de propuestas para lograr su estabilización y aprovechamiento benéfico, principalmente como fertilizante de cultivos agrícolas y mejorador de suelos. No obstante, aunque en América Latina se han generado proyectos a menor escala para la reutilización de biosólidos como materia prima para la producción de energía, no se cuenta con datos oficiales sobre las cantidades utilizadas, la cantidad de energía eléctrica producida y su utilización final. **(1)**

No basta con llevar a cabo la gestión del tratamiento de las aguas residuales, es también muy importante y necesario acoplar a las descargas de sus productos, alternativas de aprovechamiento de manera sostenible, entendiendo la sostenibilidad de un proceso como aquel que alcanza un mayor beneficio económico con la mínima carga ambiental, por lo que se debe emplear una metodología de valoración de la sostenibilidad para el aprovechamiento de éstos **(2)**, todo esto con el fin de promover la sostenibilidad ambiental y así garantizar la protección de los recursos que nos proveen de bienes y servicios, como el recurso hídrico.

La valorización de los lodos procedentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales municipales (PTAR), representa una alternativa a un grave problema ambiental al que hoy en día nos enfrentamos, y es por esto que se ha hecho necesario la creación y estudio de diversas tecnologías que permitan darle un tratamiento a dichos lodos.

En el proyecto de investigación, se llevará a cabo una revisión bibliográfica de diferentes tecnologías que puedan ser una alternativa para el tratamiento de los lodos generados en la PTAR que se espera construir en la ciudad de Manizales, analizando sus ventajas, desventajas, costos, eficiencias, normativas, complejidad y aspectos técnicos, y así evaluar su aplicabilidad en dicho contexto.

7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente es de gran interés e importancia dar un tratamiento a las aguas residuales generadas en las ciudades, no solo para garantizar la calidad de vida de las personas y los seres vivos en general, sino también para conservar y preservar el recurso hídrico. Sin embargo, el tratamiento de estas aguas residuales trae consigo una segunda problemática y es la generación de lodos, los cuales requieren igualmente un tratamiento específico.

Por cuestiones de sostenibilidad ambiental, salud pública, normativa ambiental, objetivos del desarrollo sostenible, como lo es el garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos, se hace necesario implementar tecnologías que promuevan la valorización y aprovechamiento de residuos como los lodos de las PTAR, pues estos lodos poseen contaminantes, elementos tóxicos y patógenos que hoy en día, a pesar de que ya se han tenido avances en cuanto a su gestión, siguen siendo una problemática ambiental, social y económica que pone en riesgo la calidad del medio ambiente y la salud de los seres vivos.

8. JUSTIFICACIÓN

La PTAR municipal que se espera construir en la ciudad de Manizales, se plantea en dos etapas: la primera está proyectada al año 2022, con un caudal de diseño de 420 L/s y una generación de lodos aproximada de 29,4 Ton/diarias. La segunda etapa se proyecta para el año 2034, con un caudal de diseño de 640 L/s y una generación de lodos proyectada de 44,5 ton/diarias. Por tanto se crea entonces, no solo la necesidad de darle un tratamiento y disposición adecuada, sino de buscar alternativas de valorización que permitan dar un uso y aprovechamiento a estos lodos.

Este proyecto busca determinar cuáles son las tecnologías y alternativas que se implementan actualmente en la valorización de lodos, realizar un filtro y determinar cuáles de estas pueden ser una opción factible para implementar en la PTAR que se tiene pensada para la ciudad de Manizales, revisando diferentes factores, que nos permitan analizar cuáles podrían ser las opciones más viables y que mejor se adaptarían al contexto de la PTAR que se piensa para la ciudad de Manizales.

9. OBJETIVOS

9.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar diferentes tecnologías desde la base de datos, para el tratamiento, valorización y disposición final de lodos provenientes de una PTAR y analizar su aplicabilidad en el contexto de la PTAR de la ciudad de Manizales.

9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Hacer revisiones bibliográficas acerca de la valorización de lodos y las tecnologías existentes para su aprovechamiento.
- ✓ Determinar que tecnologías son las más representativas y llamativas basándonos en los criterios base, mencionados al inicio.
- ✓ Analizar la aplicabilidad de las tecnologías más representativas para implementar en la ciudad de Manizales.

10.GENERALIDADES

10.1 ¿QUÉ ES UN LODO RESIDUAL?

Lodo residual es el residuo sólido, semisólido o líquido que se genera por el tratamiento de las aguas residuales. Su composición depende principalmente de las características del agua residual afluyente y del proceso de tratamiento utilizado (reducción de microorganismos patógenos). En la tabla 1, se muestra la composición de diferentes tipos de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, observándose lo mencionado respecto a que sus características varían en función del proceso que los origina en la planta que lo genera. Uno de los problemas para el uso y manejo de los lodos es su alto contenido de patógenos, por lo que se requiere su estabilización **(3)**.

En la siguiente figura, se puede evidenciar el proceso de formación de un lodo residual:



Figura 1. Esquema de una depuradora de aguas residuales. Fuente: CELAN - Centro de Estudios Locales de Andorra. <http://www.celandigital.com/25/index.php/brujula-afondo/medio-ambiente/edar> **(4)**.

La figura anterior, explica lo siguiente:

El *Pre tratamiento y tratamiento Primario*, es donde se retiran grandes sólidos (trapos, plásticos etc.) mediante una criba con rejillas o desbaste en el “Pozo de gruesos” y una recogida y filtrado en los “Filtros de finos” (4).

A continuación, se efectúa el desarenado y desengrasado por el cual las partículas de tamaño arena chocan contra una pared inclinada debido al movimiento del agua, y son depositadas en el fondo. Las grasas quedan flotando y van a parar a otro canal que las transportará a un contenedor (4).

Finalmente, se corrige el pH (grado de acidez) del agua para permitir la acción de los microorganismos en las fases siguientes. Las aguas residuales obtenidas en la fase anterior se llevan a una *balsa de desnitrificación* donde, por procedimientos biológicos, se elimina gran parte del nitrógeno contenido en las aguas (4).

En el *Tratamiento Secundario o Biológico*, el agua continúa (en dos grandes balsas de aireación) su depuración, llevada a cabo por bacterias aeróbicas que se encargan de degradar la materia orgánica contenida en las aguas residuales (4).

La última fase de la línea de agua se realiza en una balsa circular de mayor tamaño o decantador con fondo en forma de embudo, donde el agua permanece dos días como mínimo y el resto de partículas de materia orgánica e inorgánica insolubles (un 95% de la materia orgánica con la que entró en la depuradora) se sedimentan y se recogen (4).

En la *línea de lodos*, los lodos separados del agua que se van recogiendo en distintas fases, llegan a un digestor de lodos donde microorganismos bacterianos descomponen por fermentación la materia orgánica. Periódicamente se retiran los lodos depositados en el digestor y, después de eliminarse la mayor parte de los microorganismos, se podrán utilizar como abono agrícola (4).

Tabla 1. Composición de diferentes tipos de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

PARÁMETROS	LODOS PRIMARIOS (Sin adición de Químicos)	LODOS SECUNDARIOS (Licor mezcla de lodos activados)	LODOS DIGERIDOS (Mezcla)
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de Agua	92-96	97.5-98	94-97

(%)			
SSV (%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%SS)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos(%SS)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%SS)	2-5	1-6	3-7
Fosforo (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	10 ³ -10 ⁵	100-1000	100-1000
Metales pesados (%SS)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

SSV: Sólidos suspendidos; NMP: Número más probable; SS: Sólidos suspendidos

Fuente:(3)

10.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS

En principio, los lodos pueden ser clasificados en tres categorías: aprovechables, no aprovechables y peligrosos (3).

- ✓ **LODOS APROVECHABLES:** Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobio y anaerobio de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos (3).
- ✓ **LODOS NO APROVECHABLES:** Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos

de origen doméstico en rellenos municipales o rellenos. En esta categoría se encuentran los retenidos por rejillas gruesas y finas de las plantas de tratamiento **(3)**.

- ✓ **LODOS PELIGROSOS:** Son aquellos que contienen sustancias que pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad.

Comúnmente se suele confundir el término lodo y biosólido. La principal diferencia radica en que el biosólido es un lodo ya estabilizado, es decir, que ha tenido un proceso de tratamiento destinado a reducir la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patogenicidad, logrando reducir el nivel de peligrosidad y el grado de restricción para su reutilización **(3)**.

10.3 ¿QUÉ ES UN BIOSÓLIDO?

El término biosólido es el producto resultante de la estabilización de los materiales orgánicos (lodos) generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten ser reutilizados con restricción de acuerdo con la normativa de cada país. Así mismo, este término fue establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) para potencializar la reutilización del residuo biológico **(3)**.

Los biosólidos son lodos generados en el tratamiento de aguas residuales y sometidos a un proceso de estabilización mediante una degradación biológica de carácter anaerobio. Éstos han sido definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) en su código 40 CFR 503 como "sólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales y estabilizados biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes, bajo contenido de microorganismos patógenos, presencia permisible de metales pesados, que se puede utilizar como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos, de acuerdo con la composición fisicoquímica del biosólido y la vocación de uso del suelo"**(3)**.

Según la EPA (1994), quien es la máxima autoridad ambiental de Estados Unidos, los biosólidos se clasifican en:

- ✓ **BIOSÓLIDO CLASE A.** Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales, inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de *Salmonella sp.* es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales. La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales. Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no

tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas **(3)**.

- ✓ **BIOSÓLIDO CLASE B.** Con una densidad de coliformes fecales, inferior a 2×10^6 NMP por gramo de sólidos totales o 2×10^6 UFC por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola. Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios. Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio **(3)**.

En la tabla 2, se muestran algunas diferencias en la composición de un lodo crudo y un biosólido.

Tabla 2. Diferencias en la composición de un lodo crudo y un biosólido.

PARÁMETRO	UNIDADES	LODOS CRUDOS	LODOS DIGERIDOS ANAERÓBICAMENTE (BIOSÓLIDOS)
pH	Unidades	5-8	6.5-7.5
Alcalinidad	mg/l de CaCO_3	500-1500	2500-3500
Nitrógeno	% de ST	1.5-4	1.6-6
Fósforo	P_2O_5 % de ST	0.8-2.8	1.5-4
Grasas y Aceites	% de ST	6-30	5-20

Proteínas	% de ST	20-30	15-20
Ácidos orgánicos	Mg/l Hac	6800-10000	2700-6800
Sólidos totales	%	2-8	6-12
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60

Fuente: (3)

10.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN COLOMBIA

En Colombia se genera a diario 274 toneladas de biosólidos (94 toneladas base seca). El 97% de la producción se genera en 3 plantas: El Salitre, Cañaveralejo y San Fernando (5).

La caracterización de los biosólidos es fundamental para realizar una adecuada gestión, pues dependiendo de su calidad, se da prioridad una u otra alternativa de aprovechamiento. El control de los biosólidos de las PTAR, se basa en el análisis de parámetros fisicoquímicos, agrológicos y microbiológicos (5).

Como se puede observar en la tabla 3, los biosólidos de las grandes plantas del país presentan valores de humedad similares; por el contrario, la producción varía dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del caudal afluente (5).

Tabla 3. Comparación de algunos parámetros de biosólidos que se producen en las principales PTAR urbanas de Colombia.

Parámetro	Biosólidos			
	PTAR El salitre (Bogotá)	PTAR San Fernando (Medellín)	PTAR Cañaveralejo (Cali)	PTAR Rio frío (Bucaramanga)
Humedad (%)	67	68	66	29
Sequedad (%)	33	32	34	71
Producción Ton/día (Base húmeda)	130	80	60	2
Producción Ton/día (Base seca)	43	28	20	1,4

seca)

Fuente: (5).

Respecto a las características químicas, se destaca que las concentraciones de la totalidad de los metales pesados analizados en los biosólidos de Colombia se mantienen por debajo de los límites máximos permisibles contemplados en las principales regulaciones internacionales y en la mayoría de parámetros por debajo de las concentraciones promedio de metales pesados de los biosólidos de Estados Unidos y la Unión Europea, tal como se observa en la tabla 4 (5).

Tabla 4. Límites de concentración de metales pesados permitidos en los biosólidos en diferentes países.

Contaminante Mg/Kg	Colombia (1)	EEUU (2)	Unión Europea (2)	NORMA EPA 40CFR- 503 PC- EQ QUALITY	Límites recomendados, Unión Europea 86/278/CEE
Arsénico	0.47	4.9	Nd	41	No regulado
Cadmio	2.78	25	4	39	20-40
Cobre	180	616	380	1500	1000-1750
Cromo	849	178	145	No regulado	No regulado
Mercurio	0.85	2.3	2.7	17	16-25
Níquel	65.4	71	44	420	300-400
Plomo	84	204	97	300	750-1200
Selenio	0.46	6	Nd	100	No regulado
Zinc	966.3	1285	1000	2800	2500-4000

Fuente: (5).

10.5 NORMATIVIDAD SOBRE LODOS Y BIOSÓLIDOS

Las regulaciones de lodos en el mundo tienen varias consideraciones, pero están reglamentadas a partir de su transformación previa a biosólidos (3).

En Estados Unidos y la Unión Europea existen normativas muy similares al respecto, las cuales han sido imitadas en muchos otros países. En España se tienen en cuenta valores límite de metales pesados dependiendo del pH del suelo **(3)**.

Principalmente en Europa, se controla la tasa de aplicación (concentración de metales pesados por hectárea). EEUU recomienda calcular las tasas de aplicación teniendo en cuenta el contenido de nutrientes del biosólido y los requerimientos de los cultivos agrícolas. Adicionalmente, regula otros metales pesados como arsénico, selenio y molibdeno **(3)**.

La mayoría de normatividades regulan los mismos indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales y huevos de helmintos), y establecen la necesidad de tratamiento de los lodos (digestión anaeróbica, aeróbica, secado térmico, estabilización química, etc.) para que al ser convertidos en biosólidos puedan ser aplicados al suelo **(3)**.

A continuación, se presenta un resumen del marco normativo referente a los lodos generados en las PTAR y a los biosólidos, así como los límites máximos permisibles para microorganismos y metales pesados:

Tabla 5. Resumen marco legal lodos generados en PTAR y biosólidos.

NORMA	OBJETO
Decreto 1594 de 1984	<p>Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21.</p> <p>ARTICULO 70. Los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.</p> <p>(Se define por primera vez el término <i>lodo</i>).</p>
Resolución 822 de 1998	<p>Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico- RAS98. Se define el término <i>lodo biológico</i>.</p>
Resolución 1096 de 2000	<p>Mejoramiento de la RAS, con el fin de que los servicios públicos tal como agua potable y saneamiento básico estén en constante mejoramiento de acuerdo a estándares de calidad.</p>

RAS 2000	En el título C, indica el proceso de tratamiento de los lodos producidos en aguas duras y hervidas. Se define el término <i>biosólido</i> , pero no reglamenta la gestión de los mismos.
Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
NTC 5167 de 2004	Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos, los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.
Decreto 1287 de 2014	Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
Resolución 330 de 2017 (RAS 2017)	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo. Deroga las resoluciones 1096 de 2000, 424 de 2001, 668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. (Sección 5: Gestión de subproductos del tratamiento de agua residual).

Fuente: **Propia**.

Tabla 6. Valores máximos permisibles de microorganismos en biosólidos.

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	BIOSÓLIDOS CLASE A (MENOR QUE)	BIOSÓLIDOS CLASE B
Coliformes Fecales	1000 NMP/g ST	Menor de 2×10^6 NMP/g

		ST
Salmonella sp.	3 NMP/4 g ST	N.A
Huevos de Helminetos	1 HH/4 g ST	N.A
Virus entéricos	¼ g ST	N.A

Fuente: (3)

Tabla 7. Valores máximos permisibles de metales pesados en biosólidos.

PARÁMETRO Mg/ Kg	BIOSÓLIDOS CLASE A	BIOSÓLIDOS CLASE B
Arsénico	75	75
Cadmio	85	85
Cobre	4300	4300
Plomo	840	840
Mercurio	57	57
Molibdeno	75	75
Níquel	420	420
Selenio	100	100
Zinc	7500	7500

Fuente: (3)

11.TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN DE LODOS

11.1 AGRÍCOLA Y FORESTAL

Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales constituyen una fuente de materia orgánica alternativa a otros insumos orgánicos utilizados tradicionalmente como abonos **(6)**. Se ha encontrado que la adición de biosólidos tratados al suelo es beneficiosa para la salud del suelo, enriqueciendo el suelo con elementos nutrientes esenciales y también aumentando el pH del suelo.

Se ha reportado que el uso de biosólidos como fuente de materia orgánica, mejora las propiedades tanto físicas como químicas del suelo agrícola en cuanto a incrementos en los niveles de nutrientes, disminución de la densidad aparente, mayor formación y estabilidad de agregados, mejor retención de humedad, incremento en el tamaño de poros, etc. Junto a los beneficios del uso de los lodos, también debe considerarse los riesgos que representan estos materiales, ya que cada material es diferente y puede contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos para los cultivos o para los consumidores de los productos de los mismos. La posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas constituye su principal limitante, de ahí que su uso no puede ser indiscriminado sin una adecuada planeación y supervisión **(6)**.

Los biosólidos son ricos en materia orgánica, contenido de macro y micronutrientes vegetales y posiblemente sean un sustituto del fertilizante convencional y mejoren el rendimiento de la materia seca de diferentes cultivos. Sin embargo, muchas plantas de tratamiento de aguas residuales que no pueden producir biosólidos adecuados para su eliminación en la tierra. Esto se debe a que contienen varios elementos potencialmente tóxicos (PTE), como metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes, diferentes bifenilos policlorados, dioxinas, sulfonatos de alquilo, nanopartículas, productos de cuidado personal, productos farmacéuticos y agentes patógenos. La liberación, el movimiento y la absorción de PTE concomitante con biosólidos están influenciados por una serie de factores tales como el tipo de suelo en el que se aplican los biosólidos, el pH, la materia orgánica del suelo, el potencial redox y las uniones metálicas **(7)**.

Los biosólidos comúnmente contienen altas cantidades de bacterias patógenas humanas excretadas en las heces y la orina. Las bacterias entéricas patógenas incluyen *Salmonella spp.*, *Listeria spp.*, *Escherichia coli*, *Campylobacter spp.*, *Clostridium spp.*, *Yersinia spp.* Una gran proporción de estas bacterias son tanto patógenas como zoonóticas, lo que significa que pueden causar infecciones tanto en humanos como en animales. Además, estos microorganismos tienen una gran capacidad para adaptarse de manera persistente a los

cambios en el entorno. Esto también plantea un fuerte impacto de las propiedades del suelo. **(7)**.

11.2 FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y/O CERÁMICA

Los cementos y los hormigones se fabrican en grandes cantidades para la construcción y otras industrias. La idea de usar lodo como un componente de cemento ya ha sido explorada hasta cierto punto, especialmente por dos grupos japoneses. La industria de la celulosa y el papel ha informado sobre la fabricación de bloques de construcción y paneles con lodo. Además, los lodos se pueden combinar con fibras de celulosa en la matriz de cemento para crear el llamado hempcreto, con alta resistencia a la compresión, buena resistencia al impacto, cohesión y trabajabilidad. El uso de lodo reduce los costos debido a un menor consumo de agua, arcilla y electricidad en el proceso de producción **(8)**.

El lodo se puede utilizar como materia prima, para la fabricación de materiales para la construcción civil. La aplicación a gran escala de este método puede mejorar significativamente la situación medioambiental en las regiones industriales. La aplicación de lodo puede reducir significativamente el componente de costo de eliminación de lodo del tratamiento de alcantarillado. Como se esperaba, las propiedades mecánicas dependen de la concentración de arena de sílice, mármol y lodo. Las concentraciones más altas de arena de sílice y partículas de mármol crean menos espacio en el hormigón y, en consecuencia, aumentan la resistencia a la compresión y la deformación por compresión **(8)**.

La introducción de lodos en el proceso de la elaboración de ladrillos resulta muy atractiva porque determinados materiales cerámicos disponen de gran capacidad de inertización de metales pesados. Durante la cocción, los compuestos orgánicos del lodo (celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc.), se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales pesados, etc.), quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inmovilizados **(9)**.

En general la introducción de lodos en matrices cerámicas tiene aspectos positivos energéticamente, pudiéndose apuntar los siguientes:

- ✓ Importante ahorro energético durante la cocción cerámica en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los lodos (en cualquier caso, el balance total energético debe tener en cuenta también el proceso de secado) **(9)**.
- ✓ Ahorro del consumo de agua por la aportación de los lodos (contienen un promedio del 70 % de humedad) **(9)**.
- ✓ Poder calorífico de los lodos, que aproximadamente se sitúa en las 3400 kcal/kg **(9)**.

- ✓ El máximo porcentaje de lodos que se podría mezclar con la arcilla cerámica se sitúa en torno al 40 %, aunque con esta cantidad, la adherencia de la mezcla es pobre y la textura superficial del ladrillo irregular. Así, las proporciones óptimas están entre el 10 % y el 20 %. **(9)**.

11.3 GASIFICACIÓN POR LECHO FLUIDIZADO

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso se transforma en un gas combustible en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o dióxido de carbono), en una atmósfera de reacción netamente reductora. El producto de interés de la gasificación es el gas, compuesto principalmente de CO, CO₂, H₂, vapor de agua, CH₄ y otros hidrocarburos ligeros y N₂ (en el caso de gasificar con aire). La proporción de estos gases varía en función de la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. El gas producto de la gasificación ofrece varias opciones para su aprovechamiento, desde su uso como combustible en motores de combustión interna o en turbinas de gas para la generación de electricidad, hasta su uso como materia prima en la obtención de productos químicos como metanol, amoníaco o líquidos **(2)**.

La gasificación es una forma alternativa de tratamiento, que puede reducir la cantidad de residuos sólidos que deben eliminarse de una planta de tratamiento de agua. El gas producido se puede usar de manera muy flexible para producir energía eléctrica, quemarla muy limpiamente o usarla para la actualización. La gasificación en el lecho fluidizado y la limpieza del gas con el filtro de lecho granular han demostrado una operación exitosa. Por ejemplo, en Balingen, una planta de demostración se estableció en 2002 y se reconstruyó a un mayor rendimiento en 2010; luego, se construyó una planta de demostración en Mannheim y ahora se encuentra al final de la fase de puesta en marcha. Hoy en día, el gas producto se mezcla con el biogás procedente de la fermentación del lodo y se utiliza en un motor a gas o en una cámara de combustión para producir calor **(10)**.

El tratamiento térmico mediante combustión o gasificación destruye la creciente cantidad de componentes que se han notado como amenazantes para la salud cuando se liberan sin fisurar. Ejemplos de éstos, son hormonas y residuos de remedios. Últimamente, el tratamiento térmico mediante gasificación o pirolisis y la posterior combustión en el sitio, se volvió cada vez más interesante por dos motivos principalmente **(10)**:

- ✓ La energía restante en el lodo de aguas residuales es razonablemente alta (7-12 MJ / kg ds) para ser utilizada para uso interno y, por lo tanto, se debe comprar menos energía del mercado **(10)**.
- ✓ Darle al lodo de aguas residuales tratamiento externo cuesta dinero. Actualmente, el costo está entre 50 y 120 € / t ds **(10)**.

11.4 RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Uno de los métodos para lograr la estabilización de lodos residuales es la digestión anaerobia, la cual se realiza en ausencia de oxígeno y genera biogás (gas compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y nitrógeno), el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica. A su vez, los sistemas de digestión anaerobia son eficientes para la reducción de volumen de los lodos residuales y la carga orgánica que contienen. Sin embargo, existen inconvenientes como inversión inicial, mantenimiento del equipo, control estricto de los parámetros de digestión y operación por personal capacitado que hay que considerar para hacer eficiente el sistema y lograr el aprovechamiento óptimo del biogás producido **(1)**.

La digestión anaerobia es el proceso con mayores ventajas, sin embargo, su costo de construcción es más elevado, los digestores requieren una gran cantidad de equipos periféricos y se desestabiliza si no se lleva un buen control de la operación **(11)**.

11.5 UTILIZACIÓN DE CENIZAS COMO SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO FINO EN BLOQUES DE HORMIGÓN PREFABRICADOS

Según un estudio realizado en una planta de España, se determinó que la adición de ceniza de lodos de depuradoras (CLD) al hormigón puede suponer una disminución de la porosidad y de absorción y un aumento de la resistencia mecánica, lo que lleva a que la utilización de los lodos en los adoquines aumente la durabilidad de estos últimos **(9)**.

La fabricación industrial de bloques de hormigón donde se ha sustituido parcialmente arena por CLD, es comercialmente viable. La utilización del CLD, con un porcentaje de sustitución de arena del 15%, permite mejorar características de los bloques como la resistencia a compresión, y no mermar sustancialmente otras como la densidad y la absorción capilar **(9)**.

Por último, la adición de CLD daría respuesta a las directrices marcadas por la legislación nacional sobre sostenibilidad y valorización de residuos: se podría reducir tanto la necesidad de un gran volumen de material utilizado habitualmente como materia prima, como la de minimizar el residuo destinado a vertedero **(9)**.

11.6 INCINERACIÓN

La combustión controlada es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos se transforma en materia inerte. No se trata de un sistema de eliminación total, genera cenizas y gases, pero también produce una significativa reducción de peso y volumen del material

original, por lo que puede ser tratado como combustible derivado de residuos (CDR) si su poder calorífico es adecuado (12).

Comúnmente para la combustión de lodos se utilizan dos tipos de sistemas de incineración: Hornos de soleras múltiples y hornos de lecho fluidizado, estos último son más eficientes, más estables y más fáciles de operar, y algunas de sus ventajas en comparación con el horno de soleras múltiples son (12):

- ✓ Menor generación de NOx, CO e hidrocarburo total.
- ✓ Más adecuado para funcionamiento intermitente.
- ✓ Permite la variabilidad de la alimentación y reduce las posibilidades de choque térmico.
- ✓ Facilidad de control y automatización.
- ✓ Menor uso de combustible auxiliar.
- ✓ Costo de mantenimiento reducido.
- ✓ Sistema de control de contaminación del aire más pequeño.
- ✓ Menor consumo de energía.

12. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN

Tabla 8. Ventajas y desventajas de las tecnologías de valorización.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
AGRÍCOLA Y FORESTAL	<ul style="list-style-type: none"> - Constituyen una fuente de materia orgánica alternativa a otros insumos orgánicos utilizados tradicionalmente como abonos. - Mejora las propiedades tanto físicas como químicas del suelo agrícola. - Incrementa la productividad forestal, para reforestar y para estabilizar áreas deforestadas o perturbadas por la minería, la construcción, los incendios, el sobrepastoreo, erosión u otros factores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas constituye su principal limitante, de ahí que su uso no puede ser indiscriminado sin una adecuada planeación y supervisión. - Puede ser una alternativa problemática debido a la acumulación de metales pesados y fosfatos. - Se debe aplicar un mayor volumen al suelo por su menor potencial fertilizante.

FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y/O CERÁMICA

componentes del suelo, permitiendo que el sistema actúe con elevada capacidad de amortiguación.

-Reducción de la escorrentía y, por lo tanto, de la erosión superficial.

- Tiene un precio mucho más reducido que permite conseguir resultados similares con un importante ahorro en el costo.

- La disposición de lodos como fertilizante, debe ser de forma muy rigurosa, se deben hacer estudios detallados de su composición para identificar posibles componentes que puedan afectar la calidad del suelo.

- Durante la cocción, los compuestos orgánicos del lodo: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico.

-Importante ahorro energético durante la cocción cerámica en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los lodos.

- Ahorro del consumo de agua por la aportación de los lodos (contienen un promedio del 70 % de humedad).

- Cumplen los estándares de calidad de otros productos de similares características, prestaciones y uso existentes en el mercado.

- No se destacan variaciones importantes en las emisiones

- La mezcla arcilla-lodo se somete a temperaturas entre 80 – 120° C en las fases de extrusión y secado, que favorecen el desprendimiento de sustancias volátiles, presentes en el lodo, con un fuerte olor característico. Se recomienda una estabilización de lodos.

- El máximo porcentaje de lodos que se podría mezclar con la arcilla cerámica se sitúa en torno al 40 %, aunque con esta cantidad, la adherencia de la mezcla es pobre y la textura superficial del ladrillo irregular. Así, las proporciones óptimas están entre el 10 % y el 20 %.

de gases en los procesos de cocción.

- Reduce la cantidad de arcilla necesaria en la fabricación.
- Se dejan de emitir 3,4 kg de CO₂ por tonelada de producto, derivado del ahorro del combustible principal.

GASIFICACIÓN EN LECHO FLUIDIZADO

- Estos procesos transforman la materia orgánica de los lodos. De este modo, se consigue una reducción muy importante del volumen de residuo, además de la posibilidad de generar combustibles almacenables.
- La gran cantidad de materia inorgánica presente en los lodos puede desempeñar un papel destacado en la reducción de alquitranes gracias al efecto catalítico de muchos de sus cationes (calcio y potasio principalmente).
- Es económicamente viable, energéticamente aprovechable y ambientalmente aceptable, considerando los biosólidos como fuente renovable.
- La emisión de compuestos contaminantes a la atmósfera, es mucho menos comparado con la incineración.

-El aspecto más negativo, es la elevada generación de alquitranes.

**RECUPERACIÓN
DE ENERGÍA POR
MEDIO DE
DIGESTIÓN
ANAEROBIA**

- Genera biogás, el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica.
- Son eficientes para la reducción de volumen de los lodos residuales y la carga orgánica que contienen.
- Bajos costos de operación si se recupera el metano producido.
- Proceso excedentario en energía.
- Importante reducción de sólidos volátiles.
- Es el método más rentable económicamente para plantas que traten por encima de 7.500 m³ /día y se puede aplicar a plantas cuyo intervalo de tamaños abarca más de dos órdenes de magnitud.
- Reducción de la masa total de lodo.
- Elevado volumen de inversión preciso para llevar a cabo su instalación.
- Posibilidad de depósitos minerales en el equipo, dificultades de limpieza y posible formación de espumas.
- Existen inconvenientes como control estricto de los parámetros de digestión y operación por personal capacitado que hay que considerar para hacer eficiente el sistema y lograr el aprovechamiento óptimo del biogás producido.
- Peligrosidad de los gases inflamables producidos.
- Potencial producción de olores.
- Puede presentar problemas de "digestión acida" ya que los MO productores de metano son de crecimiento lento.
- Presenta sobrenadantes con elevadas DBO, DQO, sólidos en suspensión y NH₃.
- El hecho de adicionar ciertos porcentajes de cenizas producto de la incineración de lodos digeridos que varían entre un 5 y un 50 % genera en los ladrillos ciertas
- Afecta su resistencia al esfuerzo mecánico debido a una mayor porosidad, se reduce su resistencia afectando negativamente las

UTILIZACIÓN DE CENIZAS COMO SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO FINO EN BLOQUES DE HORMIGÓN PREFABRICADOS

propiedades variables que pueden afectar positivamente las cualidades de los mismos haciéndolos más porosos y menos densos favoreciendo sus cualidades como aislante térmico y acústico.

-Puede ser utilizado para la fabricación de hormigón.

-Se ha observado una influencia significativa de la finura de la Ceniza de Lodo de Depuradora (CLD) tanto en las propiedades mecánicas como de trabajabilidad.

-Es comercialmente viable.

- La utilización del CLD con un porcentaje de sustitución de arena del 15%, permite mejorar características de los bloques de hormigón como la resistencia a compresión, y no mermar sustancialmente otras como la densidad y la absorción capilar.

-Se podría reducir tanto la necesidad de un gran volumen de material utilizado habitualmente como materia prima, como la de minimizar el residuo destinado a vertedero.

utilidades de dichos ladrillos (6), todo esto dependiendo de la proporción en que se utilicen las cantidades de cenizas y materiales como la arena, entre otros, ya que el porcentaje óptimo de humedad para la fabricación de ladrillos debe ser del 10%.

INCINERACIÓN

- Reducción importante del volumen del lodo tras su incineración.
 - Posibilidad de reciclaje de los subproductos generados (cenizas, material inerte) como material de relleno en la producción de asfaltos, cemento o ladrillos.
 - Baja sensibilidad a la composición del lodo.
 - Sistemas fiables.
 - Minimización de olores, debido a que los sistemas son cerrados y a la alta temperatura de tratamiento.
 - La combustión destruye todos los microorganismos presentes y oxida los compuestos orgánicos tóxicos.
 - Los metales pesados en las cenizas son menos solubles.
 - Un diseño adecuado puede hacer la incineración económicamente viable.
 - La existencia de la tecnología adecuada para mantener el nivel de emisiones a la atmósfera en valores admisibles.
- Instalaciones intensivas en capital, normalmente sólo justificadas en situaciones donde se manejan grandes volúmenes de lodo.
 - Las instalaciones de incineración suelen plantear comúnmente serios problemas de contestación social.
 - Posibles problemas medioambientales.
 - De tipo económico, dado que es la alternativa más costosa de eliminación de lodos.

Fuente: **Propia.**

13.FACTORES DE COMPARACIÓN

Tabla 9. Factores de comparación.

ALTERNATIVAS	COSTO DE INVERSIÓN	COMPLEJIDAD	NORMATIVA
RELLENO SANITARIO	BAJO	BAJA	En la normativa colombiana, no se restringe esta opción.
AGRÍCOLA Y FORESTAL	BAJO	MEDIA	Los biosólidos de Clase A, pueden ser usados sin ninguna restricción. Los biosólidos de clase B pueden ser usados en recuperación de suelos, plantaciones forestales, cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios; sin embargo, las concentraciones de indicadores de contaminación fecal limitan su aprovechamiento por un tiempo en cultivos agrícolas de consumo directo como las hortalizas.
FABRICACIÓN DE LADRILLOS	MEDIO	BAJA	
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE	ALTO	ALTA	

DIGESTIÓN ANAEROBIA			
UTILIZACIÓN DE CENIZAS	BAJO	BAJA	La adición de cenizas de lodo de depuradora daría respuesta a las directrices marcadas por la legislación nacional sobre sostenibilidad y valorización de residuos.

Fuente: **Propia.**

14. TIPOS DE ESPESAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS

14.1 ESPESAMIENTO

Los procesos de tratamiento de lodos que representan a esta etapa permiten una reducción del volumen del lodo a tratar, eliminando agua y aumentando así la concentración en sólidos. El objetivo principal es el incremento de la eficacia y la optimización económica de los procesos posteriores **(13)**.

Los principales procesos de espesamiento son:

- ✓ **ESPEMAMIENTO POR GRAVEDAD:** Emplea la fuerza de la gravedad. La alimentación se produce por la zona central, en la parte inferior se recogen los lodos espesados y en la superior queda el sobrenadante. Este sistema se emplea en lodos primarios, fisicoquímicos y mixtos que decantan bien por gravedad. Los lodos biológicos decantan lentamente **(13)**.
- ✓ **ESPEMAMIENTO POR FLOTACIÓN:** El lodo se concentra en la parte superior, por la unión de microburbujas, generalmente de aire, a los sólidos en suspensión, que acaban siendo menos densos que el agua. Este tipo de sistema está indicado para el espesado de lodos biológicos debido a su baja capacidad de sedimentación **(13)**.
- ✓ **ESPEMAMIENTO MECÁNICO:** La concentración de lodo se lleva a cabo aumentando las fuerzas gravitacionales **(13)**.
- ✓ **CENTRIFUGACIÓN:** Se aplica una fuerza centrífuga que permite la separación. Se emplea principalmente en lodos biológicos. Suelen ser equipos caros que requieren medidas adecuadas de mantenimiento **(13)**.

- ✓ TAMBOR ROTATIVO: Separación por filtración, a través del tambor rotativo. Se emplea en caso de lodos biológicos. Los costes de intervención no son elevados, requieren de poco espacio y no producen olores **(13)**.
- ✓ MESAS ESPESADORAS: La separación se produce por drenaje del agua a través de una cinta horizontal porosa en movimiento. Están indicadas para lodos activos o digeridos. No es adecuado en el caso de lodos fisicoquímicos **(13)**.

15. ESTABILIZACIÓN

Cualquiera de los 3 procesos principales empleados en la estabilización de los lodos permite una reducción de la MO presente en los mismos, con el fin de **(13)**:

- ✓ Reducir los patógenos.
- ✓ Eliminar olores.
- ✓ Reducir o eliminar la capacidad de putrefacción de la MO.

Los procesos de estabilización se dividen en:

15.1 ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA

15.1.1 ESTABILIZACIÓN AERÓBICA

Proceso biológico en el que, por acción microbiológica, se oxida MO, mediante un aporte de oxígeno en los digestores abiertos. De este modo se reduce la masa final del lodo, modificándolo para adecuarlo a procesos posteriores **(13)**.

Se emplea como tratamiento secundario de una PTAR sin tratamiento primario. También puede emplearse para lodos mixtos con un aporte más elevado de oxígeno. Los factores que afectan a este proceso son:

- ✓ Tiempo de retención.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Necesidades de oxígeno y de mezcla.

15.1.2 ESTABILIZACIÓN AERÓBICA TERMÓFILA

Se trata de una digestión aeróbica auto térmica termófila desarrollada para conseguir cumplir las regulaciones cada vez más estrictas. Se basa en la conservación de la energía térmica generada en la digestión aeróbica de la MO de los lodos, para alcanzar y mantener temperaturas termófilas (50-70 °C) **(13)**.

15.1.3 COMPOSTAJE

Se trata de un proceso de descomposición biológica y estabilización de MO en condiciones controladas y aeróbicas, desarrollando temperaturas termófilas, producto del calor generado biológicamente. El resultado es un producto estable y libre de patógenos. La MO se descompone en CO₂, agua, minerales y MO estabilizada **(13)**.

Se puede llevar a cabo solo con lodos o mezclándolos con agentes estructurantes que faciliten las condiciones aeróbicas. Las principales etapas son:

- ✓ Mezclado.
- ✓ Fermentación o compostaje.
- ✓ Maduración.
- ✓ Refino.

Es efectivo en la descontaminación de contaminantes orgánicos como: Hidrocarburos de petróleo, compuestos monos aromáticos, explosivos, clorofenoles, algunos pesticidas y compuestos aromáticos policíclicos **(13)**.

Los microorganismos pueden actuar mineralizándolos o transformándolos parcialmente **(13)**.

En el caso de los contaminantes metálicos no son retirados significativamente durante el proceso. Se producen reacciones de oxidación y reducción de los mismos que influyen en la solubilidad, reduciéndose su disponibilidad y toxicidad en la fracción sólida **(13)**.

Es necesario un adecuado control, de los parámetros críticos (pH, aireación, humedad, relación C/N) para evitar condiciones anaeróbicas en la masa de compostaje que provoquen aumento de olores **(13)**.

15.1.4 ESTABILIZACIÓN ANAERÓBICA

Es uno de los métodos más comunes para la estabilización de lodos. Consiste en la degradación de la MO, por la acción de en ausencia de oxígeno, liberando energía, metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), gracias a la acción de algunos tipos de bacterias **(13)**.

Se produce en 4 etapas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis **(13)**.

Estos sistemas se clasifican en: baja carga, alta carga, contacto anaeróbico y con separación de gases. En este proceso deben controlarse:

- ✓ pH.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Alimentación de lodo.
- ✓ Tiempo de retención.
- ✓ Producción de gas.

15.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Es una alternativa a la estabilización biológica para el tratamiento de lodos. El objetivo de este tipo de estabilización es la de reducir o minimizar los patógenos y reducir sustancialmente los microorganismos capaces de producir olores **(13)**.

15.2.1 ESTABILIZACIÓN CON CAL

El producto aplicado mayoritariamente es la cal. Se añade al lodo a la dosis adecuada para mantener el pH a 12 durante el tiempo suficiente (mínimo 2 h) para eliminar o reducir los microorganismos patógenos y los responsables de los olores. Este sistema se suele usar **(13)**:

- ✓ Depuradoras pequeñas con incorporación de lodos a terrenos naturales o almacenados antes del transporte.
- ✓ Depuradoras con necesidad de estabilización adicional.
- ✓ Sistema complementario de estabilización durante periodos en que otros sistemas están fuera de servicio.

Normalmente se incorpora antes del secado de los lodos, aunque también puede emplearse a posteriori, empleando menores cantidades de cal. La dosificación de cal depende de **(13)**:

- ✓ Tipo de lodo.
- ✓ Composición química del lodo (incluyendo la MO).
- ✓ Concentración del lodo.

Durante el proceso de tratamiento de lodos mediante cal viva es necesario mantener el pH por arriba de 12, por un tiempo mínimo de 2 horas, para asegurarse la destrucción de los patógenos y proporcionar la suficiente alcalinidad residual para que el pH no descienda a menos de 11. Permitiendo, así, el tiempo suficiente para almacenamiento o disposición del

lodo estabilizado. La cantidad de cal necesaria para estabilizar el lodo está determinada por el tiempo del mismo, su composición química y la concentración de sólidos. A grosso modo, el rango va desde el 6 hasta el 51%. Teniendo en cuenta que los lodos primarios son los que menos cantidad de cal requieren y los lodos activados los que mayor cantidad emplean **(13)**.

16. HIDRÓLISIS TÉRMICA, PRETRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS

La hidrólisis térmica es un pretratamiento de residuos biológicos, entre ellos lodos residuales, que consiste en aplicar alta presión y temperatura durante un cierto periodo de tiempo. Una vez conseguida la hidrólisis de dichos lodos, el proceso continúa con la digestión anaerobia mesofílica de los mismos **(14)**.

El rango de temperaturas oscila entre 140-200 °C y la presión entre 6- 20 bar, durante unos 30 minutos aproximadamente **(14)**.

Este proceso ocasiona que las células se rompan y desintegren, siendo más fácilmente degradables por los microorganismos anaerobios. Algunos sólidos en suspensión se solubilizan y los compuestos orgánicos de cadena larga se descomponen debido a reacciones de hidrólisis. El lodo procedente de la hidrólisis térmica presenta una baja viscosidad y una alta concentración de DQO soluble. Esto hace que la producción de biogás en el digestor anaerobio sea mayor y que se produzcan una menor cantidad de lodos, ahorrando de 3 a 5 veces la energía empleada para la mezcla y el bombeo. Además, este proceso esteriliza los lodos, ya que produce la destrucción de patógenos, haciendo posible su utilización como fertilizante **(14)**.

El principal objetivo en la línea de lodos, es reducir su volumen y estabilizar el contenido de sustancias contaminantes, para evitar fermentaciones y olores desagradables. El proceso básico consiste en ESPEADORES- DIGESTORES- DESHIDRATACIÓN- DISPOSICIÓN, que en conjunto realizan la llamada digestión anaerobia.

- ✓ ESPEADORES: REDUCEN VOLÚMENES DE AGUA EN EL LODO. (CENTRIFUGAS)
- ✓ DIGESTIÓN: fermentación microbiana que produce biogás.

Tabla 10. Etapas de la hidrólisis.

ETAPAS	CONVERSIÓN
	Biopolímeros →

HIDRÓLISIS	Monómeros
ACIDOGÉNESIS	Monómeros → Ácidos grasos Volátiles, Acetato e Hidrogeno
ACETOGÉNESIS	AGV, Acet. + H → Acetato, CO2 e H.
METANOGÉNESIS	Ac, CO2 + H → Metano, CO2.

Fuente: (Ángela, 2018)

La etapa de hidrolisis se ve afectada por su lenta velocidad de degradación, por la baja solubilidad de los sólidos orgánicos contenidos. Por ello se emplean el pretratamiento, con el fin de convertir el sustrato más accesible para las bacterias anaerobias.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inversión inicial no rentable para NOx de lodos < a 3000 ton lodo/año ✓ Producción energética menor a la requerida (Balance de masas) ✓ Deshidratación previa, sequedad > 12% <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lodo recirculado > [amonio] ✓ Operadores cualificados 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inversión inicial ✓ No rentable para px de lodos < a 3000 ton lodo/año ✓ Producción energética menor a la requerida (Balance de masas) ✓ Deshidratación previa, sequedad > 12% <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lodo recirculado > [amonio] ✓ Operadores cualificados

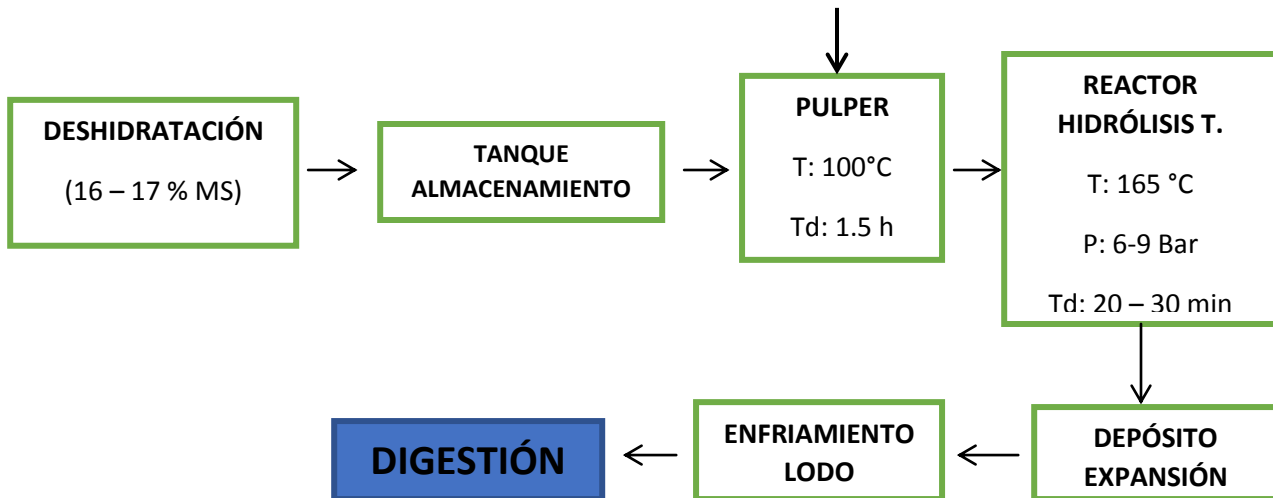
Fuente: (Ángela, 2018)

16.1 TECNOLOGÍAS COMERCIALES

Difieren en forma de operación y configuración de reactor (14).

✓ **CAMBI:** (Noruega, 1995) (14)

- 25 PTAR.
- Opera en discontinuo.
- Reactores en serie.

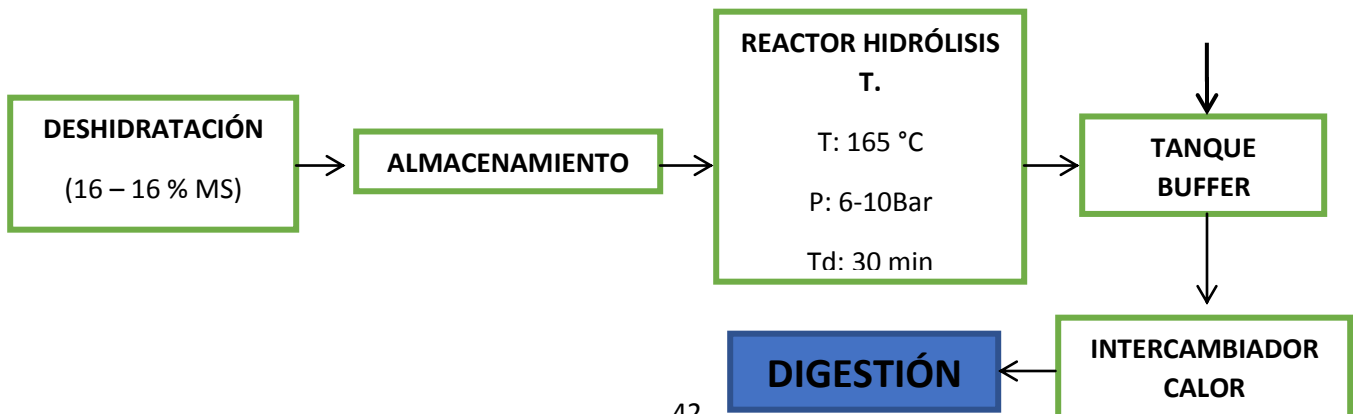


CH4: 64%

CO2: 35%

✓ **BIOTHELYS:** (Francia, Empresa Veolia) (80.800 ton lodo/año) (14)

- 7 PTAR (Francia, Reino Unido).
- Discontinuo y por lotes.
- Reactores en paralelo.
- No pulper ni flash.
- Ciclo duración: 120 - 160 min.

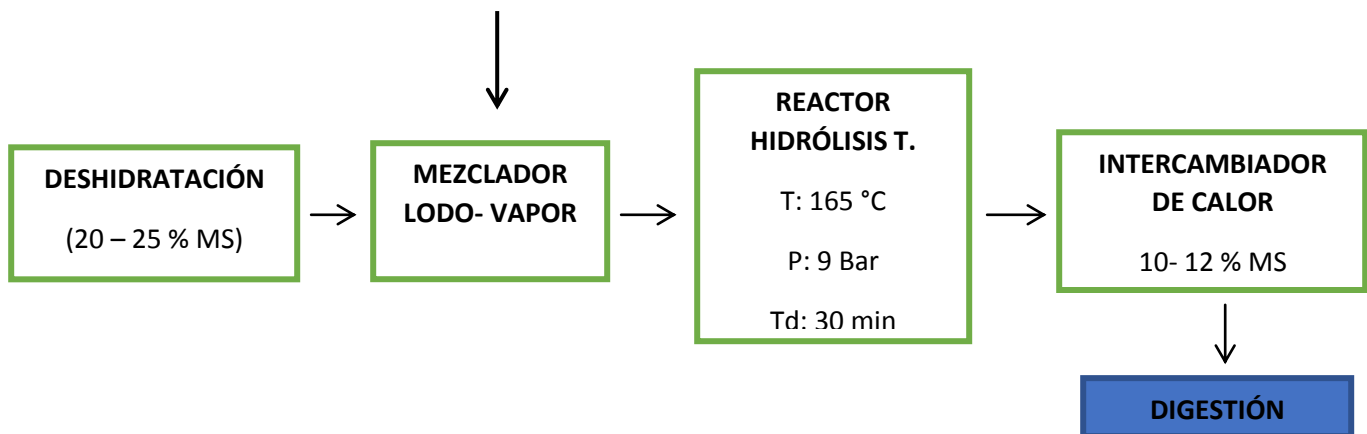


✓ **EXELYS:** (Francia, Empresa Veolia) (30.700 ton/año) (14)

- 3 PTAR (Francia)

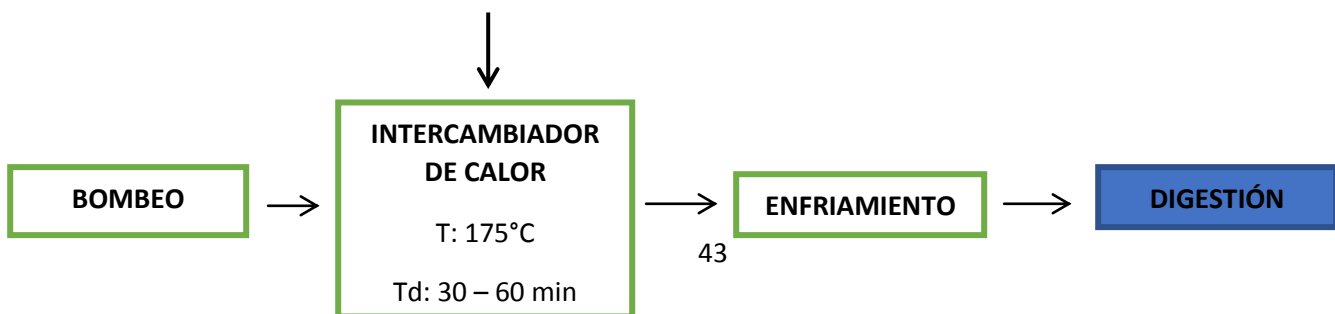
Proceso Continuo:

- 24 horas al día.
- Fácil operación y mantenimiento.
- Menor espacio requerido.
- Menor costo inversión.
- Menor producción lodos.
- Mayor rendimiento energético.

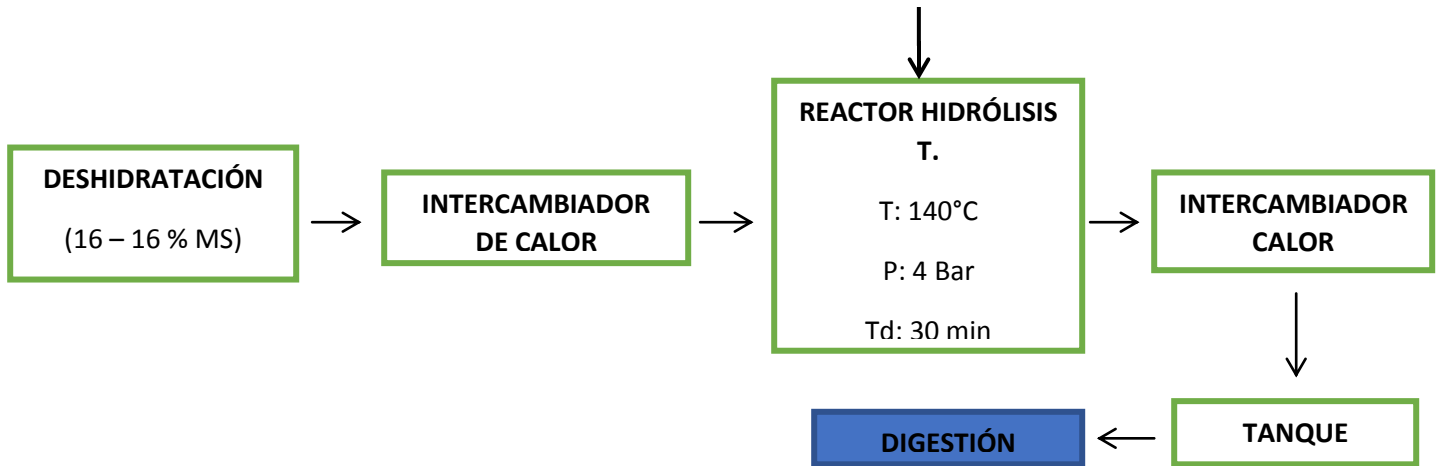


✓ **Lysotherm:** (Reino Unido) (14)

- 2 PTAR (Holanda)
- Proceso continuo [sólidos 2-12%]
- 4 PTAR (Alemania, EU, EK)



✓ **Turbotec** (Holanda, Sustec) **(14)**



17. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

La investigación se enfocó principalmente en la valorización energética, teniendo como objeto de estudio la incineración de lodos y la digestión anaerobia, debido a que son alternativas que a pesar de que tienen un considerable costo de inversión, son rentables, eficientes, y permiten que se genere una retribución económica, debido a la generación energética que brindan estas alternativas, haciendo a la PTAR sostenible en términos de consumo energético, como lo es el caso de la PTAR CAÑAVERALEJO.

18. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LODOS A PARTIR DE INCINERACIÓN

La incineración es la combustión completa de la materia presente en los residuos a incinerar y se produce en exceso de oxígeno, así se consigue **(15)**:

- ✓ Eliminar toda el agua presente.
- ✓ Minimizar a menos de 1 % la materia orgánica en los productos resultantes (reducción al 95 % del volumen de lodo húmedo).

- ✓ Las cenizas humectadas, son un 10 % de la cantidad de lodos que se generaría en un proceso convencional.
- ✓ Destrucción completa de patógenos.
- ✓ Destrucción y reducción a límites aceptables de compuestos orgánicos tóxicos que podrían crear problemas medioambientales.
- ✓ Metales pesados captados en las cenizas formadas.
- ✓ Permite recuperar energía (turbinado de vapor generado, recuperación 15 %).

Los lodos de depuradora se caracterizan por un elevado contenido en materia volátil (hasta el 70% de su materia seca), metales, carbono, hidrógeno, oxígeno, etc. El poder calorífico de los lodos los convierte en buenos candidatos para ser valorizados energéticamente. El Poder Calorífico Inferior (PCI) de los lodos suele ser del orden de 3.600 kcal/kg MS (materia seca). Este PCI sugiere un aprovechamiento energético de los lodos, ya que es un sistema de minimización y reutilización de residuos, muy útil cuando los lodos no se pueden aplicar al suelo y como alternativa a su depósito en vertedero **(16)**.

Por razones energéticas y de capacidad del horno no es conveniente introducir este lodo directamente en el horno, incorporándose una etapa de secado previo. Se puede acudir a sistemas de secado térmico, indirectos normalmente, con utilización de energía térmica recuperada de los gases de escape **(16)**.

El lodo, ya caracterizado por un contenido superior al 40% en materia seca, entra en el horno. Los dos tipos principales de hornos utilizados para la combustión de lodos son los de pisos múltiples y los de lecho fluido, los cuales se pueden visualizar en la figura 12 y en la figura 13, respectivamente. En ambos se alcanzan temperaturas comprendidas entre los 800 y los 900 °C. Para un mejor rendimiento del proceso de combustión en el horno, el aire de combustión ha de precalentarse en la caldera, hasta alcanzar aproximadamente los 500 °C. El horno dispone de una línea de combustible adicional (gas natural normalmente) para el encendido, en caso de que los lodos tengan un insuficiente poder calorífico o existan problemas con el presecado. En ocasiones puede dosificarse simultáneamente cal en el horno, con lo cual se retiene una parte del SO₂ generado y se descarga así el posterior sistema de tratamiento de gases de escape **(16)**.

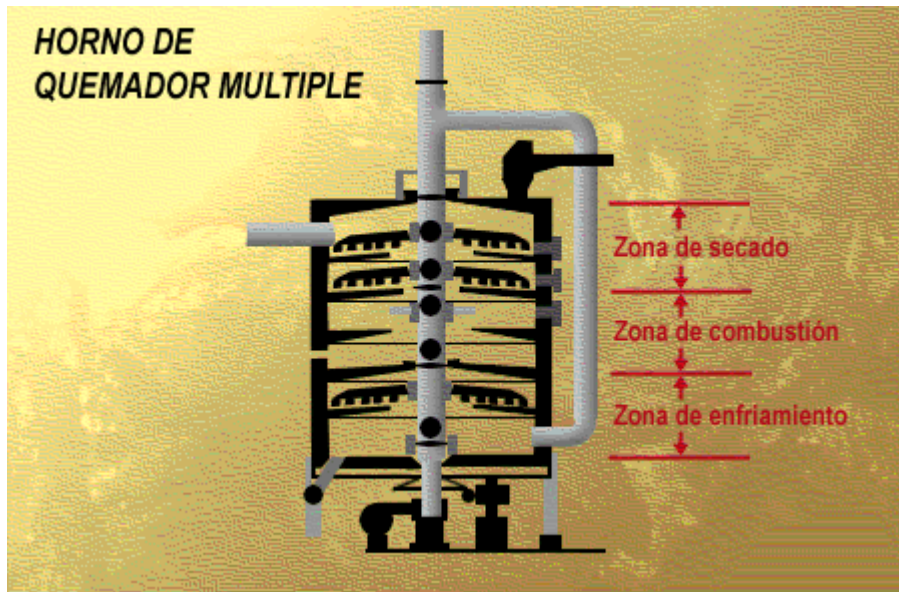


Figura 2. Horno de pisos múltiples. Fuente: (17).

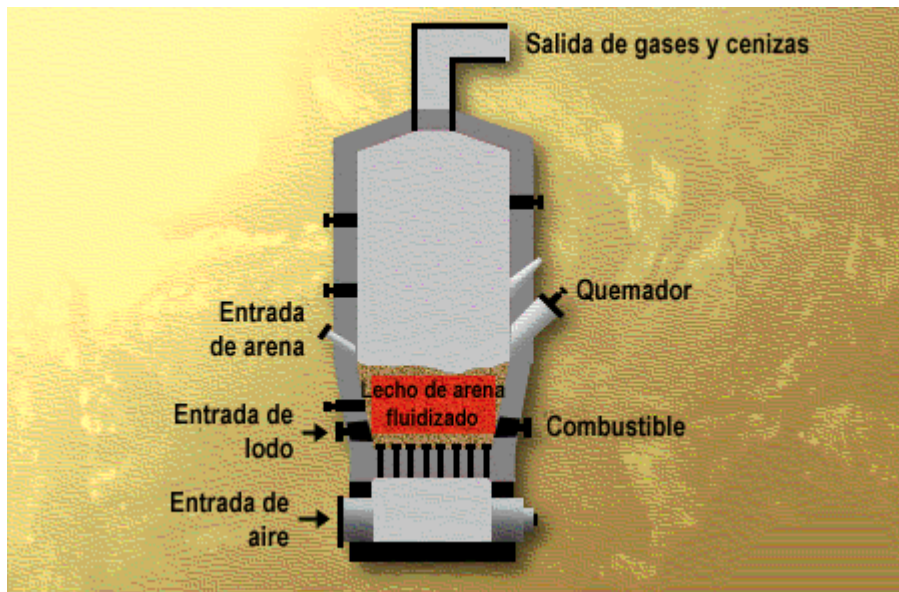


Figura 3. Horno de lecho fluidizado. Fuente: (17).

Con temperaturas de 800 - 900 °C, los gases de escape del incinerador tienen un gran potencial para la recuperación de calor. Así, es normal que el aire de combustión sea precalentado de forma que, junto con el presecado y el precalentamiento del lodo, se garantice un proceso de combustión autógeno. La temperatura del aire precalentado suele

estar en el intervalo 400 - 600 °C. La energía de la corriente de escape restante puede ser aún utilizado en otras necesidades de la planta o externas a ella **(16)**.

Línea de lodos (humos+cenizas) **(15)**:

- ✓ Los NOx y el CO se controlan con una buena operación del horno (Tlecho < 800 °C y O₂ > 6,5 % en salida de chimenea respectivamente).
- ✓ Dioxinas y furanos (organoclorados) destruidos a altas temperaturas con valores de emisión un orden de magnitud menos que el límite legal permitidos.
- ✓ Metales presentes en los lodos incinerados, excepto el mercurio, quedan retenidos en un % muy elevado en las cenizas.

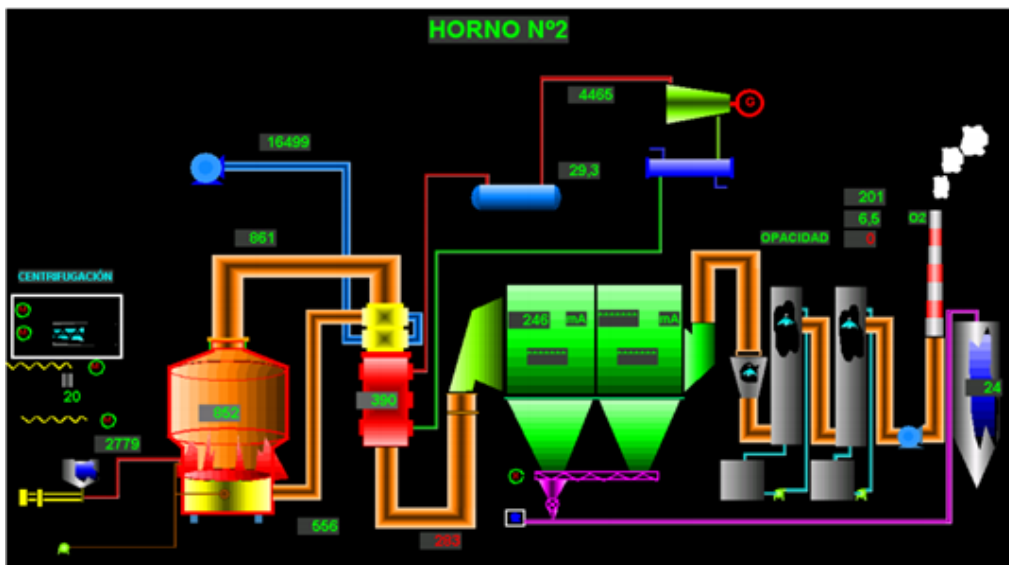


Figura 4. Vista general del incinerador de lodos y tratamiento de humos con aprovechamiento de energía. Fuente: **(15)**.

La combustión controlada, es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos se transforma en materia inerte. Como es evidente, no se trata de un sistema de eliminación total, genera cenizas y gases, pero también produce una significativa reducción de peso y volumen del material original, por lo que puede ser tratado como combustible derivado de residuos (CDR) si su poder calorífico es adecuado. Si este tipo de transformación se produce de forma incontrolada, puede originar problemas medioambientales debido a las características propias de los lodos, que pueden tener carácter ácido, básico o salino, y por otra parte pueden contener elementos de transición y no metálicos que pueden favorecer la generación de sustancias tóxicas durante el proceso de combustión **(18)**.

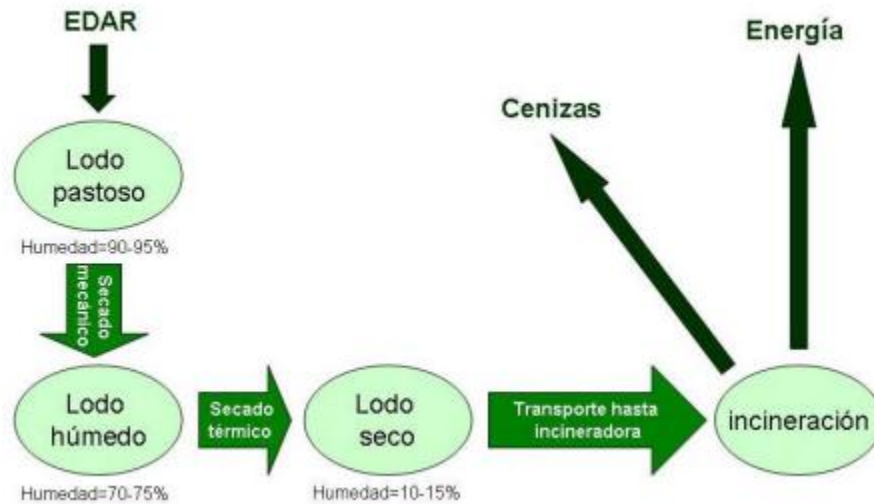


Figura 5. Representación gráfica del procedimiento de incineración para lodos digeridos procedentes de una PTAR. Fuente: (18).

Para el diseño de una planta de incineración de lodos hay que tener en cuenta los siguientes aspectos (16):

- ✓ Combustibles:
 - Tipo: lodos de origen urbano o industrial.
 - Contenido en agua
 - Fracción combustible de la materia seca
 - Poder calorífico y análisis de la materia seca (proporción de C, H, N, O, Cl, F)
- ✓ Capacidad:
 - Caudal requerido de lodos
 - Producción deseada de vapor o de calor de la planta
 - Período de operación de la planta: horas al día, días a la semana.
- ✓ Producción de energía:
 - Tipo: vapor, agua caliente, electricidad, etc.
 - Datos de energía: temperatura, presión, voltaje eléctrico.
- ✓ Materiales auxiliares:
 - Combustible auxiliar para encendido: gas natural, carbón, fuel-oil
 - Residuos peligrosos con alto poder calorífico: disolventes, aceites usados - Agua de refrigeración, energía eléctrica
- ✓ Espacio disponible - Mapa de situación de los edificios existentes, los componentes de la planta, etc.
- ✓ Leyes / Regulaciones / Normas - Regulación sobre protección ambiental y seguridad nacional, regional y local

Tabla 12. Contenido en cenizas de los lodos en base seca y en base húmeda.

LODO	CENIZAS (%) (sms)	CENIZAS (%) (smh)
1	39,10	11,74
2	28,30	11,61
3	36,47	8,35
4	24,95	7,30
5	24,44	6,69
6	54,24	25,74

Fuente: **(18)**.

Tabla 13. Dato medio de la humedad, PCI (smh), PCI (sms) de cada lodo.

LODO	HUMEDAD (%)	PCI (cal/g) (smh)	PCI (cal/g) (sms)
1	69,97	574,17	2.979,14
2	58,99	1.176,97	3.511,49
3	77,10	355,18	2.769,80
4	70,75	719,83	3.675,19
5	72,63	352,82	2.650,39
6	52,55	481,29	1.532,62

smh: sobre materia húmeda.

sms: sobre materia seca.

Fuente: **(18)**.

19. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es el proceso con mayores ventajas, sin embargo, su costo de construcción es más elevado, los digestores requieren una gran cantidad de equipos periféricos, requiere que los lodos sean calentados, el agua en el lodo contiene una elevada concentración de amoníaco y se desestabiliza si no se lleva un buen control de la operación **(11)**.

La descripción del proceso de digestión anaerobia incluye 2 etapas como se puede ver en la siguiente figura **(19)**:

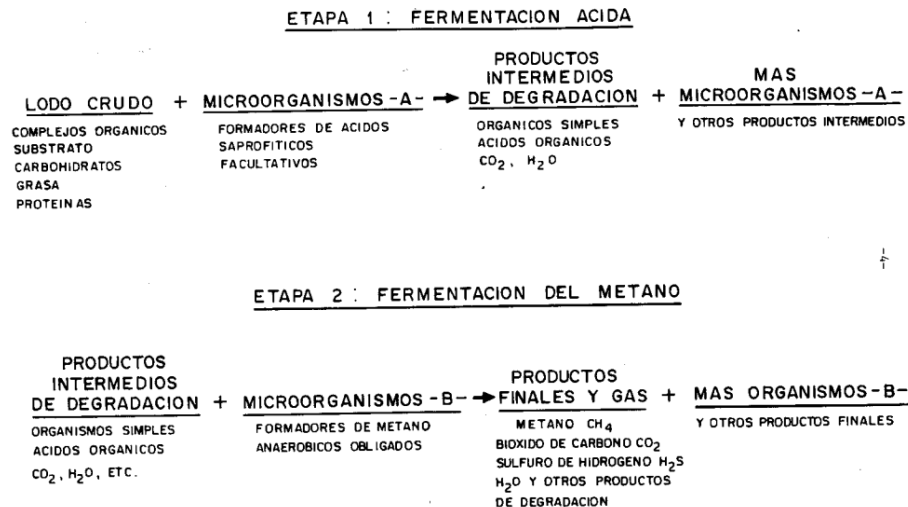


FIGURA N° 1 DESCRIPCION DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBICA

Figura 6. Descripción del proceso de digestión anaerobia.

Fuente: (19)

La primera etapa, es llevada a cabo principalmente por la acción de MO saprofiticos facultativos productores de ácido. Éstos atacan las sustancias orgánicas complejas, como carbohidratos, gases y proteínas, y las transforman en productos intermedios de la digestión, que son compuestos orgánicos más simples y ácidos volátiles orgánicos. En esta etapa los MO sintetizan el sustrato presente en el lodo crudo para mantener en balance la población bacteriana (19).

En la segunda etapa, los MO responsables son obligatoriamente de tipo anaeróbico y se denominan formadores de metano. Éstos, utilizan los productos intermedios formados en la primera etapa para producir gases asociados con la digestión, los cuales están constituidos principalmente de CH₄ y CO₂. También se producen gases como N₂, H₂s, y otros en cantidades muy reducidas (19).

El proceso se desarrolla en un reactor completamente cerrado, donde se introducen los lodos, ya sea en forma continua o intermitente, permaneciendo dentro del reactor por tiempos considerables. El lodo estabilizado, extraído del reactor tiene una concentración reducida de materia orgánica y agentes patógenos vivos. Este tipo de tratamiento comprende dos fases; la primera se lleva a cabo principalmente mediante microorganismos saprofiticos facultativos que transforman ácidos volátiles; y en la segunda las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos (20).

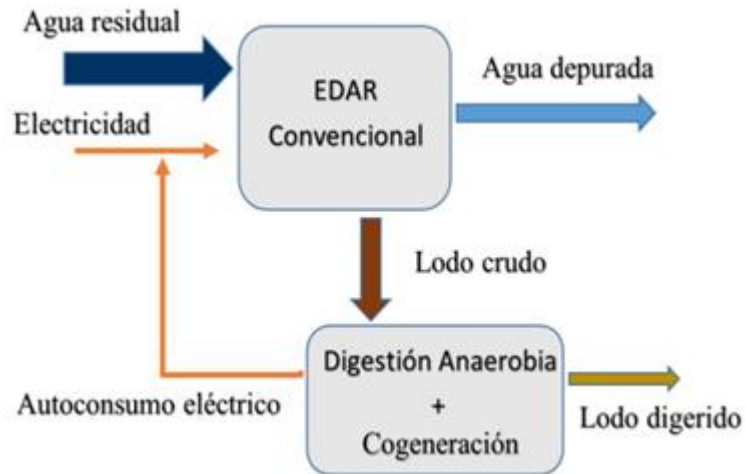


Figura 7. Proceso de la digestión anaerobia.

FUENTE: (21).

19.1 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO

Siendo la digestión anaerobia un proceso bioquímico complejo, es necesario mantener las condiciones óptimas que permitan la realización tanto de las reacciones químicas dentro de la matriz líquida del reactor, como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos en juego (19).

Existe una serie de factores componentes del proceso, los cuales son más o menos controlables por el operador y a su vez tienen varios grados de influencia en la eficiencia del proceso: Microorganismos, sustrato (comida), relación tiempo-temperatura, ph y alcalinidad, materiales tóxicos, concentración de los sólidos, ácidos volátiles (19).

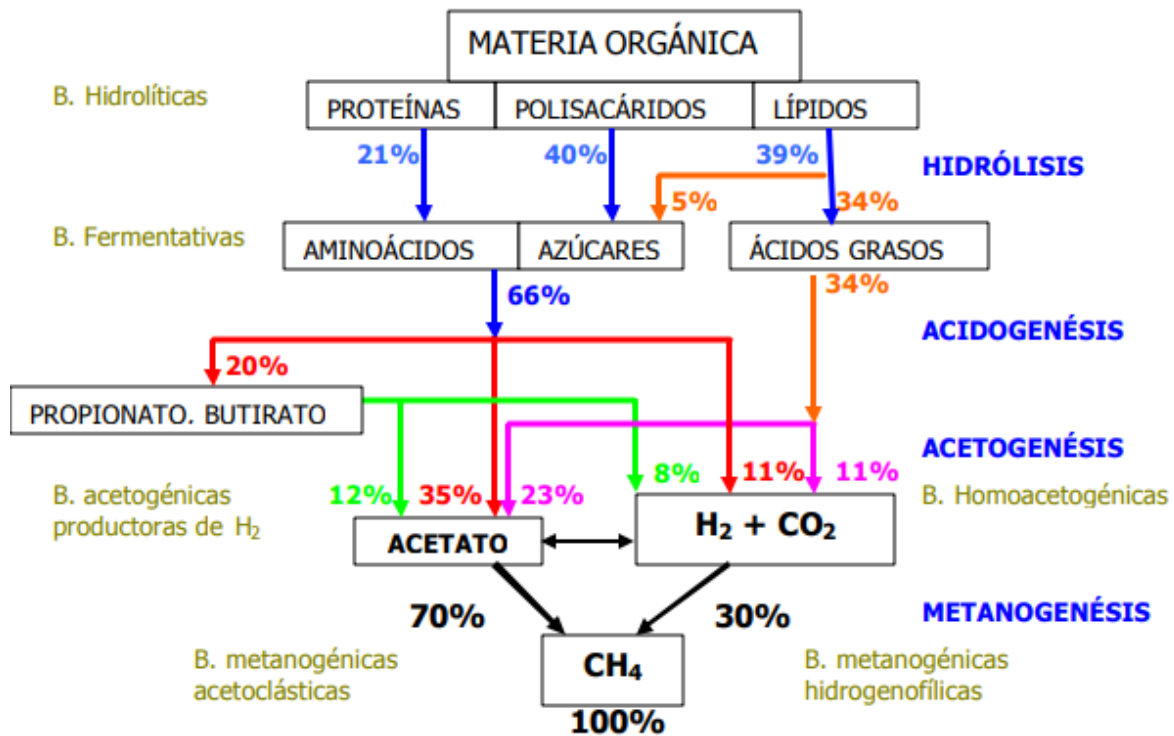


Figura 8. Etapas de la digestión anaerobia.

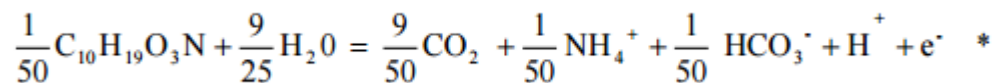
FUENTE: (22)

Según la gráfica anterior, pueden considerarse algunas limitantes para el proceso como:

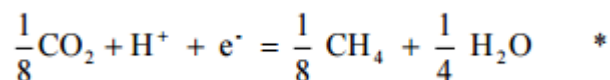
- ✓ Se observa que solamente cerca del 30% de la materia orgánica afluente es convertida a metano por la vía hidrogenofílica, por lo tanto una condición necesaria para obtener una óptima remoción de la materia orgánica en un sistema anaerobio, es que la metanogénesis acetoclástica se desarrolle eficientemente (22).
- ✓ La fermentación ácida tiende a bajar el pH, debido a la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs) y otros productos intermedarios, mientras que la metanogénesis solo se desarrolla cuando el pH está cercano al neutro. Por lo tanto, si por alguna razón la tasa de remoción de AGVs a través de la metanogénesis no acompaña a la tasa de producción de AGVs, puede surgir una situación de inestabilidad, es decir, baja significativamente el pH del sistema, causando la inhibición de las bacterias metanogénicas. Esta "Acidificación" del sistema es una de las principales causas de falla operacional en los reactores anaerobios. Lo anterior puede ser evitado cuando se garantiza un equilibrio entre la fermentación ácida y la fermentación metanogénica, a través de mantener una alta capacidad metanogénica y una buena capacidad buffer en el sistema (22).

19.2 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

El sustrato de la mayoría de las reacciones es la materia orgánica, es decir, el donador de electrones, en condiciones anaerobias los aceptores más comunes son nitratos, sulfatos y dióxido de carbono. En algunos casos la materia orgánica es usada como aceptor y donador a ese proceso se le denomina fermentación. Para conocer la energía que se obtiene de la oxidación de la materia orgánica y de la reducción de los productos finales es necesario construir una reacción estequiométrica que involucre los sustratos, los productos y la energía que se produce durante la conversión de uno a otro. En el caso de la metanogénesis la reacción para la generación de energía (Re) se determina escribiendo primero la reacción de oxidación (donador de electrones, Rd) **(23)**.



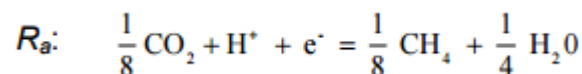
y posteriormente la reacción de reducción (aceptor de electrones, Ra):



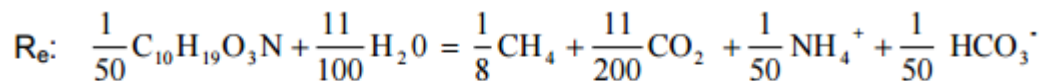
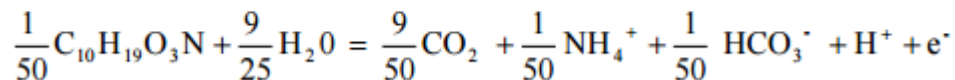
Se hace una resta algebraica y se obtienen los coeficientes de cada una de las especies involucradas.

$$R_e = R_a - R_d$$

Esto es:



R_d :



(* Las reacciones de oxidación y reducción fueron tomadas de Rittmann y McCarty 2001, donde $C_{10}H_{19}O_3N$ corresponden a la fórmula obtenida para lodos residuales municipales)

Con ésta última reacción obtenida podemos aseverar que cuando 1/50 mol (ó 4g) de lodos residuales son convertidos en energía durante la digestión anaerobia, 1/8 de mol (ó 16 g) de metano se forman y 11/200 de dióxido de carbono ascienden hacia la fase gaseosa. Una relación muy importante que debe ser observada en la ecuación es la que existe entre los

moles de NH_4^+ y HCO_3^- - que son los responsables del valor de pH dentro del proceso de digestión **(23)**.

19.3 PRODUCCIÓN DE BIOGAS

El denominado biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65%) y el anhídrido carbónico (35- 45%) y en menor proporción, nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0- 1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo **(23)**.

El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia volátil destruida, según sean las características del lodo **(23)**.

El biogás del digestor (debido al metano) posee un poder calorífico aproximado de 4,500 a 5,600 Kcal/m³. El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (8,500 Kcal/m³), pudiéndose aumentar eliminando todo o parte del CO₂ presente en el biogás. La producción total de gas depende fundamentalmente de la cantidad de alimento consumido por las bacterias o, dicho de otra forma, de la cantidad de sustrato eliminado en el proceso. Dicho sustrato suele expresarse normalmente por la demanda de oxígeno (normalmente DQO), y por los sólidos volátiles **(23)**.

Según Eckenfelder los valores máximos de la producción de gas por lodo de la Estación Depuradora de Aguas Residuales son:

- ✓ 1-1.25 m³ /kg SV destruidos
- ✓ 0.30-0.42 m³ CH₄/Kg DQO destruido

Según Brady la producción de gas, en condiciones normales de funcionamiento de un digestor, debe oscilar entre 0.44 y 0.75 m³ por cada kilogramo de materia volátil destruida. También la producción del biogás puede ser estimada a partir de una base per cápita, según Metcalf, el rendimiento normal es de 15 a 22 m³ /103 hab. •día en depuradoras con tratamiento primario. En depuradoras con tratamiento secundario la producción se incrementa cerca de 28 m³ /103 hab. •día **(23)**.

Teniendo en cuenta la heterogeneidad en la composición del sustrato se entiende que la cantidad de biogás que se puede producir a partir de un determinado tipo de sustrato y su composición (y, por tanto, su contenido energético) dependerá de su composición química. La potencia calorífica inferior del biogás es aproximadamente de 5 250 Kcal/m³, para una riqueza en metano del 60% **(23)**.

Tabla 14. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado.

COMPONENTE	RESIDUOS AGRÍCOLAS	LODOS DE DEPURADORA	RESIDUOS INDUSTRIALES	GAS DE VERTEDERO
METANO	50 – 80%	50 – 80%	50 – 70%	46 – 65%
DIÓXIDO DE CARBONO	30 – 50%	20 – 50%	30 – 50%	34 – 55%
AGUA	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
HIDRÓGENO	0 – 2%	0 – 5%	0 – 2%	0 – 1%
SULFURO DE HIDRÓGENO	100 – 700 ppm	0 – 1%	0 – 8%	0,5 – 100 ppm
AMONIACO	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
MONÓXIDO DE CARBONO	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	Trazas
NITRÓGENO	0 – 1%	0 – 3%	0 – 1%	0 – 20%
OXÍGENO	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	0 – 5%
COMPUESTOS ORGÁNICOS	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm (terpenos, esteroides)

Tomado de: (23)

19.4 USOS DEL BIOGAS

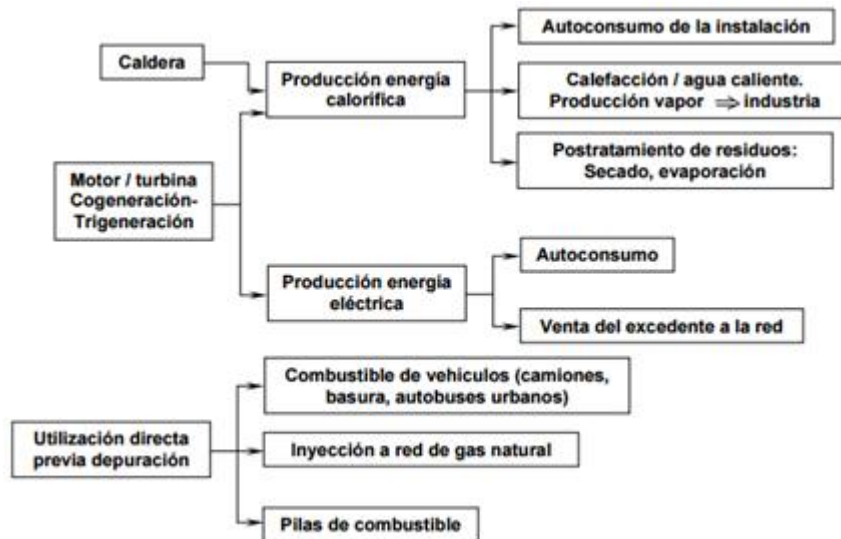


Figura 9. Usos del biogás.

Fuente: (23).

La composición volumétrica del gas generado en la digestión anaerobia del lodo de aguas residuales contiene 65 - 70 % metano (CH₄), 25 - 30 % dióxido de carbono (CO₂), y muy pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y algunos otros gases (6).

Un metro cúbico de metano, tiene un poder calorífico de ~ 35, 800 kJ. Como se mencionó anteriormente el gas suele tener un 65 % de metano por lo que el poder calorífico del gas de digestión es de ~ 22, 400 kJ/m³ Comparado con el gas natural, el cual tiene un poder calorífico de 37, 300 kJ/m³ su poder calorífico es considerable. El gas de digestión se puede emplear como combustible para calderas y motores de combustión internos que, a su vez, se pueden utilizar para el bombeo de agua residual, generación de electricidad y funcionamiento de aireadores (6).

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos (24).

Para la producción de calor o vapor, el uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H₂S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C (24).

Para la generación de electricidad o combinación de calor y electricidad, los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el

calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H₂S (bajo 100 ppm) y vapor de agua **(24)**.

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones **(24)**.

Como combustible para vehículos, el uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido **(24)**.

Sin embargo su difusión está limitada por una serie de problemas:

- ✓ A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bares); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión **(24)**.
- ✓ La conversión de los motores es costosa (instalación similar a la del gas natural) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos **(24)**.
- ✓ Por último la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso **(24)**.
- ✓ Susceptibilidad de la digestión anaerobia a fallas debidas a la acumulación de ácidos grasos volátiles **(23)**.
- ✓ La digestión anaerobia falla por debajo de pH=6 y por arriba del pH=8 **(23)**.
- ✓ Un factor importante, para la determinación del volumen de los digestores, es la temperatura **(23)**.

19.5 REQUERIMIENTOS DE TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DEL USO

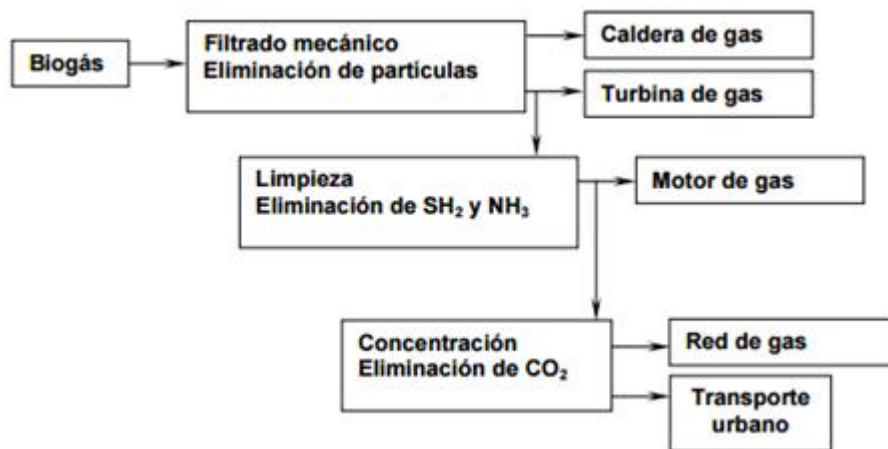


Figura 10. Requerimientos de tratamiento del biogás en función del uso.

Fuente: (23)

El biogás (CH₄ - CO₂) no es absolutamente puro, puesto que contiene partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá el biogás. La purificación del biogás es importante por dos razones principales: (1) para aumentar el poder calorífico del biogás y, (2) cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.). Los propósitos de purificación y/o acondicionamiento del biogás se resumen en la ilustración 12. El “tratamiento completo” implica que se elimina gran parte del CO₂, vapor de agua y otros gases traza del biogás, mientras que el “reformado” es la conversión de metano en hidrógeno. Las partículas sólidas en el biogás se filtran con los colectores de partículas convencionales. Para la remoción de gases traza, las técnicas utilizadas son el lavado, adsorción y secado (24).

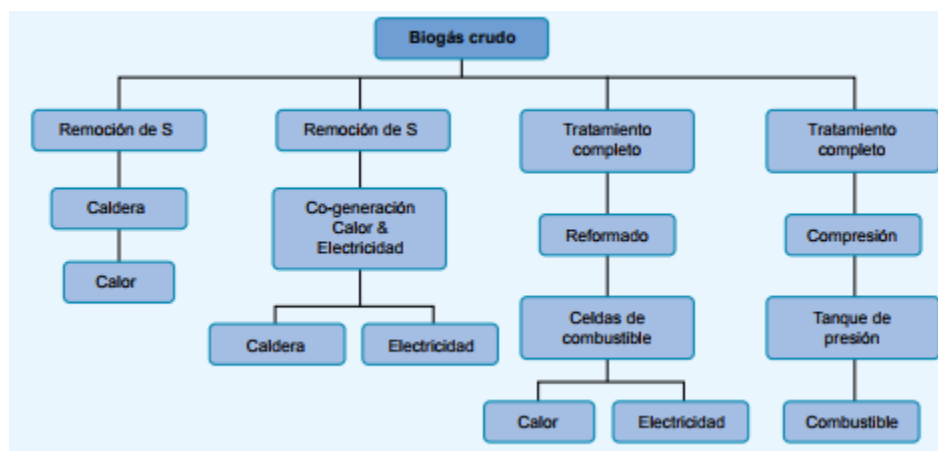


Figura 11. Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación.

FUENTE: (24)

19.6 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE INVERSIÓN Y ENERGÍA ELÉCTRICA ANUAL

Tabla 15. Estimación del coste de inversión y energía eléctrica anual.

	COSTE DE INVERSIÓN	E. ELÉCTRICA €/AÑO
LODO	1,440,500	592,843.95
foRSU	4,241,636	6,426,164.45
CODIGESTIÓN	4,493,824	6,488,838.6

Fuente: (23)

19.7 ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO MEDIO DEL DIGESTOR DE LODO

Tabla 16. Estimación del presupuesto medio del digestor de lodo.

OBRA CIVIL	904,307.84	50.345%
DIGESTIÓN ANAEROBIA LODOS (BIENES DE EQUIPO)	672,692.58	37.450%
CONDUCCIONES Y LÍNEA DE GAS	219,227.35	12.205%
TOTAL, PRESUPUESTO	1,796,227.77	100%

Fuente: (23)

20. ESQUEMA QUE SE PROPONE

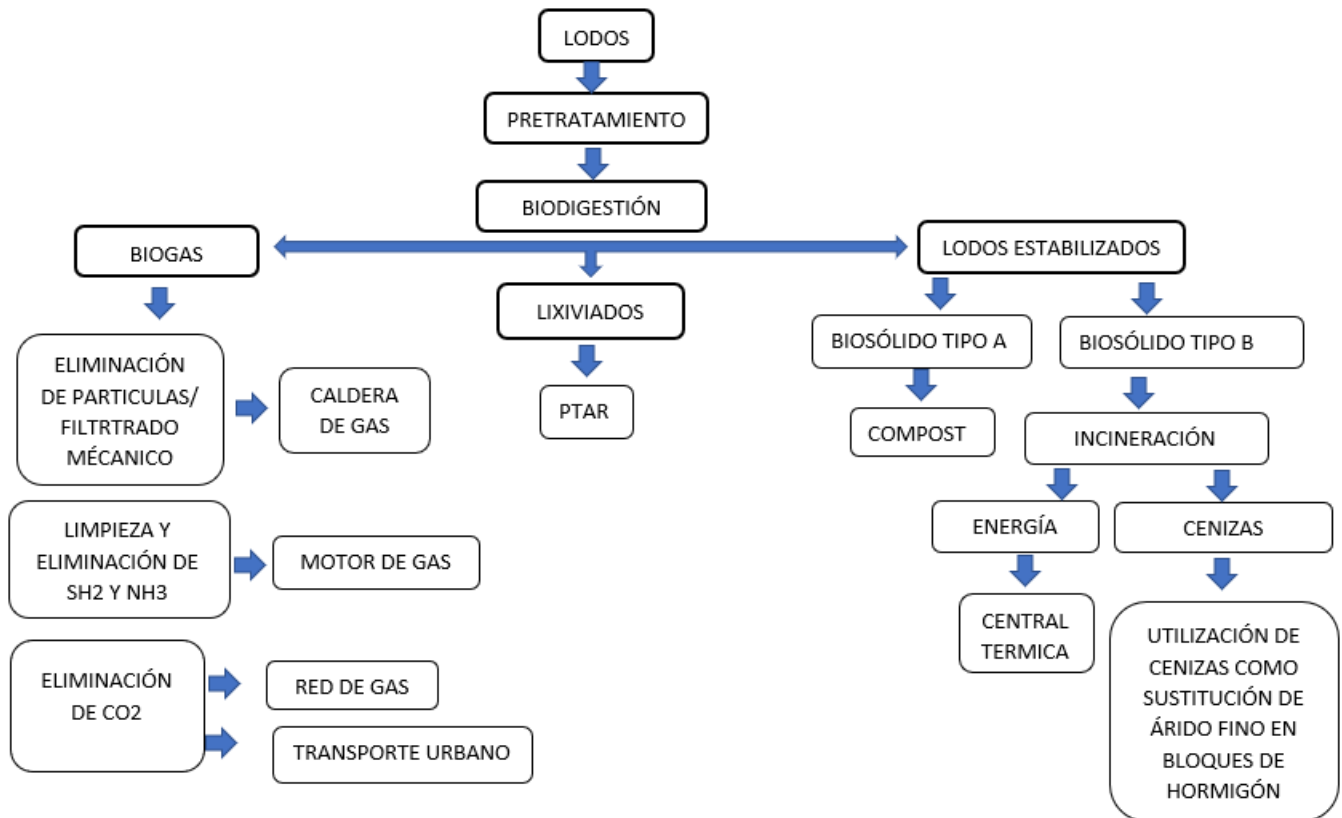


Figura 12. Esquema propuesto.

Fuente: Propia.

21.CONCLUSIONES

- ✓ La valorización energética es una opción claramente viable, considerando no solo que el proceso de digestión anaerobia en condiciones normales produce de 0,4 a 0,7 m³ de biogás por cada kilogramo de materia volátil destruida, sino también que la calidad del biogás depende en gran medida de la concentración de metano presente en éste. Para este caso, la concentración de metano en el lodo residual representa una composición que oscila entre el 50 - 80%, lo cual representa un gas eficiente en términos de calidad.
- ✓ La hidrólisis térmica se recomienda como pretratamiento eficiente, ya que lo que se pretende en este caso de valorización energética, es que la producción de biogás, en la digestión anaerobia, sea lo más eficiente posible. Este pretratamiento permite entonces que la producción total de gas no solo sea mayor, en comparación al gas que puede

producirse en condiciones normales, sino que además de esto tiene un valor agregado ya que la cantidad de lodos que se produce es menor.

- ✓ La demanda de energía y la producción de energía renovable (biogás) no son directamente proporcionales a la cantidad de agua tratada, ya que de su composición depende la calidad y cantidad de los lodos que se generen, de los cuales a su vez dependerá la calidad del biogás generado con base en el porcentaje de metano que éste contenga.
- ✓ La estabilización anaerobia se plantea como una primera fase para el aprovechamiento energético, ya que el biogás que se genera en el digestor posee un poder calorífico aproximado de 4.500 a 5.600 Kcal/m³, lo que permite deducir que puede llegar a abastecer entre el 40% y 60% del consumo energético en una PTAR.
- ✓ La incineración de biosólidos se plantea como una segunda fase para su aprovechamiento energético, ya que estos pueden tener un potencial de poder calorífico que oscila entre 2.000 Kcal/Kg y 3.000Kcal/Kg, además de que las cenizas que quedan como subproducto en la incineración del lodo, se pueden comercializar en la industria cementera para la fabricación de materiales de construcción, como los bloques de hormigón.
- ✓ El aprovechamiento energético puede ser una tecnología fácilmente adaptable a nuestro contexto, ya que la demanda energética es uno de los factores que más cantidad de costos genera en el funcionamiento de una PTAR, por la demanda energética que implica éste, por lo tanto, si podemos obtener energía a través de los lodos, podemos autoabastecer gran parte o la totalidad de la demanda energética de la planta y retribuir parte de los costos de operación.

22.BIBLIOGRAFÍA

1. Rojas, R.; Mendoza, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México.http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200006
2. Cano, Andrea N. (2012). Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio ambiente. Medellín, Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/8652/1/tesisnataliacano.pdf>
3. Donado R. (2013). PLAN DE GESTIÓN PARA LODOS GENERADOS EN LAS PTAR-D DE LOS MUNICIPIOS DE CUMARAL Y SAN MARTÍN DE LOS LLANOS EN EL

DEPARTAMENTO DEL MET
.https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1

4. CELAN - Centro de Estudios Locales de Andorra. <http://www.celandigital.com/25/index.php/brujula-afondo/medio-ambiente/edar>
5. Gian Paolo, GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre Fase I. Ingeniero Ambiental y Sanitario (Universidad de La Salle), <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/biosolidos.pdf>
6. Builes, S. (2010). Tratamiento y adecuada disposición de lodos domésticos e industriales. universidad tecnológica de Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1835/62839B932.pdf?sequence=1>
7. Sharma, B., Sarkar, A., y Singh, P. (2017). Agricultural utilization of biosolidos: A review on potential effects on soil and plant grown. Waste Management.
8. Barrera, C., Martínez, G., Gencel, O., Bernal, L., Brostow, W.(2011). Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes.
9. Pérez, María T.; Baeza, Francisco; Garcés, Pedro; Galao, Óscar; Palá, Jordi. USO POTENCIAL DE CENIZA DE LODO DE DEPURADORA COMO SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO FINO EN BLOQUES DE HORMIGÓN PREFABRICADOS. 2013. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/36270/45339>
10. Judex, W, J., Gaiffi, M., y Burgbacher, H,C. (2012). Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant. Waste Management.
11. Limón, J.G., (JULIO DE 2013), LOS LODOS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, ¿PROBLEMA O RECURSO?, Guadalajara, Jalisco. http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
12. Office of water, EPA. (2003). Use of Incineration for Biosolids Management. Biosolids Technology Fact Sheet
13. Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos, Tratamiento de aguas residuales, efluentes y aire al servicio del Medio Ambiente. <http://blog.condorchem.com/tratamiento-de-lodos/>
14. P. Martin. 2015 “Tecnologías comerciales de hidrólisis térmica de lodos de depuradora. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/13756/1/TFM-I-297.pdf>
15. Palacios, J. (2013). Incineración de lodos como alternativa en la línea de fangos de una EDAR. EDAR La Cartuja (Zaragoza).

- 16.** CAPÍTULO 2: ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO AVANZADO
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3779/fichero/Capitulo_20.pdf
- 17.** Capítulo: Reducción de sólidos. Sección: Incineración.
http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/CURSO/UNI_08/u8c6s2.htm
- 18.** F.J. Colomer Mendoza, M. Carlos Alberola, L. Herrera Prats, A. Gallardo Izquierdo, M.D. VIABILIDAD DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LODOS PROCEDENTES DE DISTINTOS TIPOS DE DEPURADORAS Bovea Universitat Jaume I INGRES (Ingeniería de Residuos)
<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/22773/32650.pdf?sequence=1>
- 19.** Yanéz, F. DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE LODOS. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan2/05862/05862-16.pdf>
- 20.** Grupo de Investigación GEAAS. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROTOCOLOS PARA CARACTERIZACIÓN DE LODOS. UNIVERSIDAD DE CALDAS.
[file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Protocolo%20para%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20lodos%20\(PCLM\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Protocolo%20para%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20lodos%20(PCLM).pdf)
- 21.** APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LODOS. COGENERACIÓN. Bioplast depuración. <http://bioplastdepuracion.com/index.php?s=noticia&n=15>
- 22.** R. Jenny A. TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES.
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- 23.** Montes, M.E., (2008). ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA CONJUNTA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y LODOS DE DEPURADORA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS. Tesis Doctoral.
http://oa.upm.es/1049/1/MARIA_ESTELA_MONTES_CARMONA.pdf
- 24.** Varnero, M. Teresa. Manual de Biogas. 2011. FAO.
<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

