



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

**TRABAJO FIN DE GRADO
TÍTULO: “COMPARACIÓN DE LAS
APLICACIONES DE LOS LODOS DE
DEPURADORA (EDAR)”**

Autor: PAULA MAMOLAR ALONSO

Fecha: ARTURO ROMERO SALVADOR

Tutor: JULIO 2020

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	4
3.1. ¿QUÉ ES UNA EDAR?	4
3.2. ¿CÓMO FUNCIONA?	4
3.3. RESIDUOS QUE SE GENERAN Y TRATAMIENTOS A LOS QUE SE SOMETEN	6
4. OBJETIVOS	7
5. MATERIAL y MÉTODOS	7
6. RESULTADOS y DISCUSIÓN	8
6.1. GESTIÓN DE LOS LODOS	8
6.2. POSIBLES APLICACIONES DE LOS LODOS	9
6.2.1. AGRICULTURA	10
6.2.2. COMPOSTAJE	14
6.2.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	14
6.2.3.1. BIOGÁS (DIGESTIÓN ANAEROBIA)	14
6.2.3.2. CEMENTERAS	16
6.2.4. INCINERACIÓN	17
6.2.5. VERTEDERO	18
7. CONCLUSIÓN	18
8. BIBLIOGRAFÍA	19

1. RESUMEN

La importancia creciente de la producción de lodos, procedentes de la depuración de aguas residuales domésticas o urbanas, está planteando serios problemas para su almacenamiento, y, sobre todo, para su eliminación. Es por esto que resulta necesaria la búsqueda de opciones, asequibles, reales y respetuosas con el medio ambiente, que permitan la reducción o eliminación de estos residuos.

En la actualidad, prevalece la inclinación a lo que llamamos residuo cero, un concepto basado en la reutilización de los residuos, que evita así su almacenamiento o incineración sin recuperación de la energía y, que contribuye a la descontaminación del ambiente.

Una de las medidas más aceptadas y con más beneficios para hacer frente a esta tendencia, es la aplicación a la agricultura de los lodos de depuradoras de aguas residuales, siempre y cuando, cumplan con los parámetros establecidos. Otras tendencias que, por sus beneficios ambientales, están al alza en cuanto a la eliminación de estos lodos, son el compostaje y el aprovechamiento energético, por ejemplo, en cementeras. Por último, en este trabajo hablaremos también sobre la eliminación de los lodos en incineradoras sin valorización energética y en vertederos que, aun en menor medida, todavía se siguen utilizando para deshacernos de estos residuos.

PALABRAS CLAVE: lodos, aplicaciones de los lodos, reutilización de los lodos.

2. ABSTRACT

The increasing importance of sludge production, from domestic or urban wastewater treatment, is posing serious problems for its storage, and, above all, for its disposal. For this reason, it is necessary to search for affordable, real and environmentally friendly options that allow the reduction or elimination of these wastes.

Currently, the inclination to what we call zero waste prevails, a concept based on the reuse of waste, thus avoiding its storage or incineration without energy recovery and contributing to the decontamination of the environment.

One of the most accepted and most beneficial measures to face this trend is the application of sewage treatment sludge to agriculture, as long as they comply with the established parameters. Other trends that, due to their environmental benefits, are on the rise in terms of the elimination of these slurry, are composting and energy use, for example, in cement plants. Finally, in this work we also talk about the disposal of sludge in incinerators without energy recovery and landfills, which, although to a lesser extent, are still being used to get rid of this waste.

KEYWORDS: sludge, sludge applications, sludge reuse.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. ¿QUÉ ES UNA EDAR?

Para proteger la salud de la gente y la calidad del medioambiente, es necesario que las aguas residuales que se generan sean recogidas y luego depuradas, para posteriormente devolverlas sin riesgos de nuevo en la naturaleza o reutilizarlas¹.

Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es una instalación donde llegan las aguas sucias, de procedencia municipal, industrial (si son asimilables a las urbanas) y pluvial, y pasan por una serie de tratamientos físicos, químicos y biológicos, tras los cuales salen depuradas y listas para ser devueltas al medio ambiente.

Actualmente, existen un gran número de industrias que presentan en sus instalaciones una estación depuradora de aguas residuales industriales (EDARI) propia, con lo que las aguas de éstas no se juntan con las aguas domésticas o urbanas.

3.2. ¿CÓMO FUNCIONA?

En una EDAR, el agua que llega sucia se somete a tratamiento para eliminar la carga contaminante, para así poder ser retornada al medio ambiente en las mejores condiciones para su reutilización¹. Pero, los distintos tipos de aguas residuales que llegan a las estaciones depuradoras presentan entre ellas diferente composición:

- Las aguas residuales domésticas contienen, principalmente, contaminantes orgánicos, tanto disueltos como en suspensión¹.
- Las aguas residuales industriales, por su parte, varían de una instalación a otra. Pueden contener sustancias tóxicas de naturaleza orgánica e inorgánica, metales pesados e hidrocarburos¹.
- Las aguas de lluvia contienen sustancias disueltas y materiales en suspensión. Las sustancias disueltas suelen ser ácidos generados a partir de gases presentes en la atmósfera, compuestos orgánicos, tanto de origen atmosférico como presentes en los materiales con los que contactan en su arrastre (tejados, muros, pavimentos), metales pesados e hidrocarburos¹.

Estas aguas sucias que recibe la depuradora llegan a través de la red de colectores y se depositan en el pozo de llegada, para desde ahí, iniciar posteriormente su tratamiento. El exceso de agua que llega, queda almacenada en el tanque de tormentas hasta que pueda pasar a ser depurada¹.

Desde el pozo de llegada, las aguas sufren en primer lugar un tratamiento primario, donde:

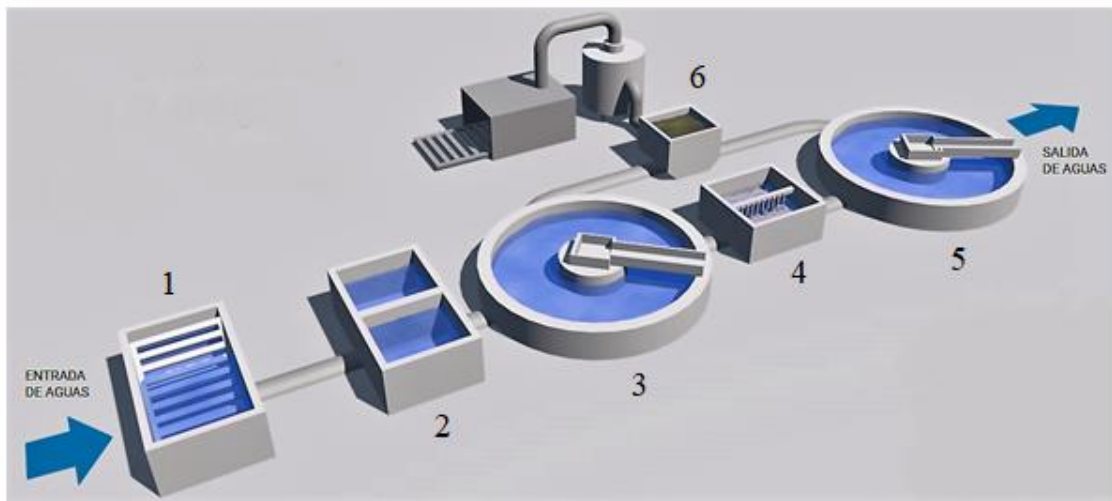
- Primero se realiza el desbaste de gruesos, una criba inicial de toda la materia gruesa que lleva el agua: piedras, ramas, plásticos y otros compuestos residuales. Para ello el agua pasa por un conjunto de rejillas y de tamices que eliminan progresivamente estos sólidos¹.
- Posteriormente se procede a la eliminación de grasas, arenas y otros sedimentos de menor tamaño que todavía están presentes tras el cribado inicial. Para el desengrasado y el desarenado se inyecta aire y se reduce la velocidad de paso del agua. El aire introducido mediante burbuja gruesa concentra las grasas en la superficie del depósito, mientras que las arenas se depositan en el fondo por la menor velocidad del agua¹.
-

Gracias al procesado inicial de esta materia, evitamos la obstrucción de los equipos posteriores de tratamiento de aguas residuales².

Una vez superado el pre-tratamiento, el agua pasa por un proceso de decantación primaria. Aquí, el agua circula lentamente por unos depósitos, donde la materia orgánica y la inorgánica en suspensión se decantan al fondo por gravedad y forman los llamados fangos primarios (más densos que los secundarios). Estos se desvían a la línea de fangos para ser tratados en la planta y posteriormente valorizados¹.

En el siguiente paso, ya el llamado tratamiento secundario, el agua fluye por un reactor biológico, en el que se aplica un tratamiento por medios biológicos, en el cual, se introduce oxígeno a través de unos turbocompresores para que los microorganismos presentes en él se mantengan en vida y se alimenten de la materia orgánica restante disuelta en el agua que, de esta forma, se elimina¹. Los biosólidos (lodos) que se han formado en este paso, se depositan por gravedad y ayudados por el escaso movimiento del agua, en el fondo del decantador, en un proceso que se conoce como decantación secundaria. Constituyen los llamados fangos secundarios o biológicos que, en parte, se desvían a la línea de fangos para ser tratados y valorizados también¹.

Finalmente, el agua sufre el llamado tratamiento terciario, que afina la eliminación de materia en suspensión con el fin de desinfectar, para así poder adecuar el agua para su vertido a un efluente y para su consumo¹.



LÍNEA DE AGUAS

FIGURA 1: LÍNEA DE AGUAS
FUENTE: FUNDACIÓN AQUAE¹

En la imagen:

1. Pre-tratamiento (desbaste).
2. Pre- tratamiento (desengrasado y desarenado).
3. Decantación primaria.
4. Reactor biológico.
5. Decantación secundaria.
6. Línea de fangos (espesador, digestor y plataforma de deshidratación).

3.3. RESIDUOS QUE SE GENERAN Y TRATAMIENTOS A LOS QUE SE SOMETEN

En la operación de depuración de aguas sucias se generan residuos tales como:

- DESBASTE/RSU: llamamos desbaste o cribado al residuo que se genera tras el paso por unas rejillas de desbaste de toda la materia sólida de tamaño grande que es capaz de verse arrastrada por los conductos del agua residual que llega a la EDAR. Algunos ejemplos de residuos del desbaste son las compresas, los envoltorios de productos de baño, las toallitas húmedas, ramas...².
- GRASAS: nos referimos a grasas, aceites de cocinas y otras materias flotantes³, que eliminamos del agua al comienzo del proceso de depuración mediante tratamientos físicos, para evitar el deterioro de los equipos de uso posterior.
- ARENAS: son gravas, arenas y otros elementos pesados³ que han conseguido pasar las rejillas de desbaste y que quedan retenidas en el fondo del depósito de desengrasado/desarenado gracias a la disminución de la velocidad del paso del agua por el mismo.
- LODOS: también llamados fangos o biosólidos, están constituidos por una mezcla de tierra y agua. Suponen el residuo mayoritario que se genera en las estaciones depuradoras de aguas residuales. Según el *Real Decreto 1310/1990*, se define como “lodos de depuración” a los “lodos residuales salidos de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, urbanas o de aguas residuales de composición similar a las anteriormente citadas, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas para el tratamiento de aguas residuales”⁴.

Tanto el desbaste, como las grasas y las arenas, tal y como se generan, se depositan en contenedores que una vez llenos, se gestionan según cada residuo lo requiera.

En el caso de los lodos, antes de su gestión para la aplicación en un destino final, se someten a una serie de tratamientos en la línea de fangos, existente en la mayoría de las depuradoras. Por esta sección pasan, tanto los lodos resultantes de la decantación primaria, como los generados en la decantación secundaria. Los equipos por los que pasan los lodos para su tratamiento son:

1. ESPESADOR DE LODOS: los fangos y la materia sedimentada son espesados y mezclados para reducir su volumen. El proceso se realiza en parte por decantación y en parte por flotación¹.
2. DIGESTOR DE LODOS: cuando el fango ya es espeso, pasa al digester anaerobio. En esta fase se elimina la parte fermentable, ya sea empleando compuestos químicos o aprovechando la actividad de los microorganismos presentes. La digestión anaerobia libera biogás (con elevado contenido en metano). Este producto de la digestión se almacena en gasómetros, para posteriormente poder ser usado como combustible, que muchas EDARs utilizan como fuente energética. El excedente de gas se elimina en una antorcha de quemado para evitar liberarlo a la atmósfera¹. Hablaremos más en profundidad de la digestión anaerobia y el biogás que este proceso genera en el apartado de “POSIBLES APLICACIONES DE LOS LODOS”.
3. DESHIDRATACIÓN DE LODOS: por último, se almacena el fango en un depósito en el que se produce su deshidratación. A través de filtros o de centrifugas, se reduce al máximo el agua restante para que sea más fácil y económico transportarlo para ser reutilizado o eliminado¹.

El objetivo de reducir y manipular estos fangos es que puedan ser valorizados, es decir, reutilizados o eliminados sin perjuicio para el medio ambiente. Con la valorización de los lodos, conseguimos una forma de gestión que permite obtener beneficios de ellos y así, evita que la mayoría de residuos generados en la depuradora vayan al vertedero⁵. Así, según la *Directiva 2008/98/CE* de residuos, se define “valorización” de las siguientes maneras⁵:

- Operación cuyo resultado principal es que el residuo sirva para una finalidad útil, al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular⁵.
- Preparación del residuo para cumplir una función particular, en una instalación o en la economía en general⁵.

4. OBJETIVOS

Uno de los objetivos de este trabajo es conocer las diferentes aplicaciones posibles que existen actualmente para la reutilización o eliminación de los lodos de EDAR doméstica o urbana, una vez producidos.

Pero el objetivo principal será entender cuál de todas estas aplicaciones es la más adecuada y por qué.

Para ello vamos a ver cómo se comportan estos residuos en cada uno de los posibles destinos de los mismos y qué beneficios aportan al ser humano y al medio ambiente al ser empleados o eliminados en los mismos.

5. MATERIAL y MÉTODOS

La elaboración de este trabajo se ha llevado a cabo mediante la búsqueda de información en diferentes bases de datos informatizadas. Para ello se introdujeron en el buscador algunas palabras clave, como son “destino lodos EDAR”, “aplicaciones lodos EDAR”, “aplicación de lodos en agricultura” o “eliminación de lodos”, entre otras.

De las páginas web consultadas se han incluido publicaciones de los últimos 10 años que hacían referencia a alguno de los temas buscados. Algunas de las páginas de las que se ha recogido información son empresas privadas como “ENVIRA” o “TECPA”, otras son blogs personales, como “TU BLOG DE AGUA” y otras pertenecientes al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), como “CEDEX”. También se ha utilizado información recogida del *Real Decreto 1310/1990*, que regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Una vez recopilada toda la información, se contrastó y se procedió a la redacción de esta revisión bibliográfica.

6. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Antes de centrarnos en las aplicaciones que actualmente conocemos para los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), es interesante mencionar, de forma breve, la normativa que regula la gestión de los mismos.

6.1. GESTIÓN DE LOS LODOS

La gestión de lodos de depuradoras está regulada por una estricta normativa⁶.

Los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales urbanas son considerados como residuos no peligrosos según se establece en la *Decisión de la Comisión*, del 3 de mayo del 2000, que sustituye a la *Decisión 94/3/CE*⁶.

La actividad de los productores de lodos está sometida a la *Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados (LRSC)*, del 28 de julio. Su principal obligación es asegurar su tratamiento adecuado, asumido directamente por ellos o encargado a un gestor autorizado conforme a lo que establece esta norma⁶.

La gestión de los lodos de depuradoras una vez que salen de las plantas de tratamiento se debe realizar respetando los principios relativos a la protección del medio ambiente y la salud humana de la política de residuos. Esto implica el uso de una jerarquía en las opciones de gestión, priorizando siempre la prevención sobre la reutilización, el reciclado y otros tipos de valorización, incluida la energética, quedando en último lugar la eliminación, pudiendo ser mediante la incineración o el depósito en vertedero⁶.



FIGURA 2: JERARQUÍA DE GESTIÓN DE RESIDUOS

Para la regulación relativa a la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, se crea el Registro Nacional de Lodos, cuya información actual se recoge conforme a la *Orden AAA/1072/2013, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario*, del 7 de junio⁶. Además, los lodos de depuración tratados deben ir acompañados de un documento de identificación durante su transporte desde la instalación de tratamiento hasta las

explotaciones agrarias en las que serán aplicados. Este documento debe contener información referida en el Anexo II de la orden anteriormente mencionada⁶. Los gestores que realizan la aplicación al suelo de los lodos tratados, además, deben emitir dos documentos cuando lo hacen, un documento de aplicación de los lodos, del que se debe entregar una copia al agricultor, y otro con información anual de las aplicaciones que realizan de lodos⁶.

6.2. POSIBLES APLICACIONES DE LOS LODOS

Ya en la línea de tratamiento de fangos de las estaciones depuradoras de aguas residuales, podemos hablar de una de las posibles aplicaciones de éstos. Aquí, los lodos pueden sufrir un primer aprovechamiento energético en la fase de digestión anaerobia, en la que se forma el biogás que puede emplearse como combustible.

Otra aplicación de los lodos, una vez ya se han deshidratado, y que permite un rendimiento energético de los mismos, es su utilización en los hornos de las cementeras, en las cuales, además, las cenizas generadas en los mismos se incorporan al producto final⁷.

La eliminación de los lodos mediante incineración sin recuperación de la energía, está siendo sustituida por las aplicaciones mencionadas anteriormente, ya que los gases y residuos materiales que se generan no pueden ser reciclados ni valorizados y terminan en vertederos controlados, que deben garantizar la protección de la salud humana y del medio ambiente.

El compostaje de los lodos consiste en la obtención de nuevos materiales o el reciclaje de parte de ellos para evitar el uso de nuevas materias primas⁸. Es la tendencia con mayor peso actualmente, después de la aplicación de los lodos a la agricultura, que, debido a que es el destino mayoritario en España⁹, se creó el Registro Nacional de Lodos, que debe incluir toda la información relativa a las instalaciones depuradoras y de tratamiento, los gestores y los campos utilizados⁴.

Año	Destino de lodos de instalaciones de depuración de aguas residuales (1.000 t de materia seca)				
	Uso agrícola	Depósito en vertedero	Incineración con recuperación de energía	Otros usos	Total
1997	332,0	131,6	20,0	205,2	688,8
1998	354,0	143,6	33,5	185,0	716,1
1999	413,7	150,9	33,5	186,7	784,8
2000	454,3	153,1	70,2	176,0	853,6
2001	606,1	131,0	54,8	100,4	892,3
2002	658,5	160,5	68,9	99,4	987,3
2003	669,6	162,8	76,8	103,0	1.012,2
2004	662,0	156,5	39,2	147,6	1.005,3
2005	628,6	163,9	39,7	154,0	986,2
2006	687,0	168,1	41,1	168,8	1.065,0
2007	780,9	181,5	38,8	168,0	1.169,1

TABLA 1: DESTINOS DE LODOS DE EDARs EN ESPAÑA DESDE 1997 HASTA 2007

FUENTE: MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN⁹

8.9. Producción y destino de lodos , 2012

CCAA	Lodos generados (t.m.s.)	Destinos							
		Aplicados en suelos agrícolas		Eliminados en vertedero		Incinerados		Otros destinos	
		(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%
C.A. Andalucía	110.109	93.892	85%	14.315	13%	0	0%	1.902	2%
C.A. Aragón	29.537	9.106	31%	431	1%	20.000	68%	0	0%
C. Foral de Navarra	12.631	12.313	97%	0	0%	0	0%	319	3%
C.A. Canarias	31.422	0	0%	30.966	99%	0	0%	456	1%
C.A. Cantabria	27.800	18.127	65%	3.827	14%	0	0%	5.846	21%
C.A. Castilla-La Mancha	58.112	51.970	89%	1.132	2%	0	0%	5.009	9%
C.A. Castilla y León	64.910	60.686	93%	3.929	6%	0	0%	294	0%
C.A. Cataluña	135.058	107.320	79%	1.231	1%	24.668	18%	1.840	1%
Ciudades Autónomas de Ceuta y Melilla	982	0	0%	0	0%	982	100%	0	0%
C. de Madrid *	197.345	185.656	94%	5.373	3%	1.234	1%	5.082	3%
C. Valenciana	198.690	184.583	93%	1.802	1%	163	0%	12.143	6%
C.A. Extremadura	14.357	11.423	80%	2.892	20%	0	0%	43	0%
C.A. Galicia	110.346	96.318	87%	5.030	5%	2.693	2%	6.305	6%
C.A. Islas Baleares	44.221	20.796	47%	4.122	9%	0	0%	19.303	44%
C.A. La Rioja	19.040	19.022	100%	0	0%	0	0%	19	0%
Principado de Asturias	2.548	1.688	66%	838	33%	0	0%	25	1%
C.A. País Vasco	39.138	8.838	23%	3.505	9%	25.518	65%	1.277	3%
Región de Murcia	34.515	33.194	96%	1.098	3%	0	0%	223	1%
ESPAÑA	1.130.761	914.929	81%	80.490	7%	75.258	7%	60.084	5%

Fuente: Registro Nacional de Lodos

TABLA 2: DESTINOS DE LODOS DE EDARs POR CCAA EN ESPAÑA EN 2012
FUENTE: MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN¹⁰

En la tabla 1, podemos ver el incremento anual en la producción de lodos que se originó en España entre los años 1997 y 2007. Consecuencia de ello, aumentaron las cifras de aplicación y eliminación de los mismos en todos los destinos, pero, mientras la aplicación a agricultura aumentó en un porcentaje desde un 48,2% en 1997 hasta un 66,79% en 2007, el depósito en vertedero decayó desde un 19,1% en 1997 hasta un 15,52% en 2007, respecto al total de los posibles destinos de los lodos.

En la tabla 2, aparecen, por Comunidades Autónomas, los destinos a los que se aplicaron en 2012 los lodos de EDARs. Se observa que, más o menos, las toneladas de lodo producidas se mantienen con respecto a 2007, pero el porcentaje de aplicación entre los diferentes destinos varía de nuevo a favor de la agricultura, subiendo hasta el 81% y, de nuevo, disminuye el depósito en vertedero hasta un 7%.

Gracias a estas tablas, hemos visto que en España, la tendencia en aumento para la valorización de los lodos de estaciones depuradoras es la aplicación de éstos a agricultura. Este hecho es debido a los múltiples beneficios que ofrece y que veremos de forma más extensa a lo largo de este trabajo.

A continuación, vamos a describir más detalladamente cada una de las posibles aplicaciones de los lodos, de mayor a menor importancia actualmente.

6.2.1. AGRICULTURA

Una de las opciones con más beneficios para deshacerse de los lodos de depuración actualmente, es la aplicación a la agricultura. Está demostrado que la composición de estos lodos, aunque es variable, les convierte en una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes para su utilización en la actividad agraria que resulta ser la vía más adecuada para su eliminación como forma de valorización material⁴. Gracias a esto se produce un doble beneficio, ambiental y agrario, consecuencia de la eliminación sin alteración relevante del equilibrio ecológico y del efecto que se deriva de su aplicación en nuestros suelos⁴.

Debido a la producción de este residuo y su utilización en agricultura en España, resulta necesario establecer un marco normativo que regule esta actividad. En el *Real Decreto 1310/1990*, del 29 de octubre, se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. Definidos así en este *Real Decreto*, los “lodos tratados” serán los “lodos de depuración tratados por una vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan de forma significativa su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su

utilización". Aquí también definida se encuentra la “actividad agraria”, como “aquella encaminada a la producción de especies vegetales con finalidad alimentaria para el consumo humano o ganadero o con otras finalidades no alimentarias”⁴.

Para usar los lodos con esta finalidad, es necesario conocer su naturaleza y calcular la dosis de aplicación, además de tener controlados los efectos sobre el suelo, el agua, la cubierta vegetal y la salud humana⁴. Teóricamente, el cálculo de la dosis máxima admisible de lodos de depuración puede realizarse mediante varios criterios, siendo, en todos los casos, la dosis de lodos recomendable la más restrictiva¹¹:

- Criterio 1: limitación de las aportaciones de metales pesados según lo establecido en el Anexo IC en el *Real Decreto 1310/1990*, según la *Orden Ministerial AAA 1072/2013* y de acuerdo con otras normativas vigentes según el territorio en el que nos encontremos¹¹.
- Criterio 2: necesidades de nitrógeno por el cultivo¹¹.
- Criterio 3: necesidades de fósforo por el cultivo¹¹.
- Criterio 4: necesidades en materia orgánica del suelo, en el caso de que se pretenda un aprovechamiento de los lodos de depuración como enmienda orgánica¹¹.

En la práctica, los criterios determinantes para el cálculo de la dosis máxima admisible de lodos de depuración en el sector agrario son los dos primeros¹¹.

La experiencia ha permitido también constatar el carácter perjudicial que pueden tener los lodos cuando determinadas especies químicas inorgánicas, como los metales pesados, alcanzan concentraciones superiores a un cierto umbral y son aplicados en determinados tipos de suelos, a dosis muy altas o en momentos determinados del ciclo vegetativo de las plantas que van a ser aprovechadas directamente por los animales domésticos o por el hombre⁴.

En la tabla 3 podemos ver los valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a agricultura.

ANEXO I B

Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria
(mg/kg de materia seca)

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con Ph menor de 7	Suelos con Ph mayor de 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

TABLA 3: VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LODOS
FUENTE: *RD 1310/1990*⁴

En la tabla 4, sacada del Anexo IA del RD 1310/1990, vemos el límite de concentración de metales pesados que podrán soportar los suelos sobre los que se aplicarán los lodos.

ANEXO I A

Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos
(mg/kg de materia seca de una muestra representativa de los suelos tal como la define el anexo II C)

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con Ph menor de 7	Suelos con Ph mayor de 7
Cadmio	1	3,0
Cobre	50	210,0
Níquel	30	112,0
Plomo	50	300,0
Zinc	150	450,0
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150,0

TABLA 4: VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS
FUENTE: RD 1310/1990⁴

➤ DOCUMENTACIÓN QUE ACOMPAÑA A LOS LODOS:

Los titulares de las estaciones depuradoras deberán tener registradas las cantidades totales de lodo producidas y las distintas aplicaciones de las mismas, indistintamente vayan a agricultura o a cualquier otro destino, para que, con periodicidad anual, se entreguen al órgano responsable de su control⁴.

Toda partida de los lodos tratados destinada a la actividad agraria deberá ir acompañada por una documentación expedida por el titular de la estación depuradora de aguas residuales en la que quedarán claramente establecidos el proceso de tratamiento y la composición de la mercancía⁴. Estos documentos deben conservarse y facilitarse, si se solicitan, al órgano competente de la Comunidad Autónoma en la que radiquen los suelos sobre los que se va a realizar la aplicación⁴. Además, en el caso de la aplicación a agricultura, toda la información relativa a los lodos, tratamiento, composición, cantidad producida, gestor, destino..., se almacena en el Registro Nacional de Lodos, un documento de carácter administrativo y público, adscrito al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación⁴.

Para su transporte y aplicación, los lodos deberán ir acompañados de un albarán en el que se especifique el lugar de producción, la cantidad transportada y a aplicar, el transportista y el destino exacto de los mismos. Además, en el albarán también aparecerá una analítica reciente (de no hará más de un año hecha) de la composición de los lodos y de los suelos donde se aplican los mismos. Una copia de este albarán se quedará en el lugar de producción de los lodos, otra será para el gestor, otra para el transportista y otra para el agricultor de las tierras sobre las que se apliquen los lodos.

INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO DE LOS LODOS			
Nombre de la instalación:		NIMA:	
Entidad concesionaria de la instalación:		NIF:	
INFORMACIÓN DEL GESTOR QUE REALIZA LA APLICACIÓN DE LOS LODOS			
Nombre/razón social del gestor:		NIF:	
INFORMACIÓN DEL USUARIO DE LOS LODOS			
Nombre:		NIF:	
INFORMACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LOS LODOS			
Municipio:	Parcela:	Provincia:	
Polígono:	Parcela:	Recinto SIGPAC:	
Coordenadas geodésicas ¹	Longitud:	Latitud:	
Superficie en la que se ha aplicado el lodo (ha):			
Cantidad de lodos aplicada (t):	Materia seca (%)	Cantidad de lodos aplicada (t m.s.):	
Cultivo:			
Fecha de aplicación (dd/mm/aaaa):			
CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS APLICADOS Y DEL SUELO			
Tratamientos ² aplicados a los lodos (tanto en la EDAR como en otras instalaciones):			
MUESTREO Y ANÁLISIS		SUELO	LODOS ³
Metales pesados	Unidades	VALOR EN EL SUELO	VALOR EN LOS LODOS
Cadmio	mg/kg m.s.		
Cobre	mg/kg m.s.		
Níquel	mg/kg m.s.		
Plomo	mg/kg m.s.		
Zinc	mg/kg m.s.		
Mercurio	mg/kg m.s.		
Cromo	mg/kg m.s.		
Parámetros agronómicos	Unidades	VALOR EN EL SUELO	VALOR EN LOS LODOS
Materia seca	%		
Materia orgánica total	% (sobre m.s.)		
pH	-		
C/N	-		
Nitrógeno total	% N (sobre m.s.)		
Nitrógeno amoniacal	% NH ₄ ⁺ (sobre m.s.)		
Fósforo total	mg P ₂ O ₅ /kg m.s.		
Potasio total	mg K ₂ O/kg m.s.		
Calcio total	mg CaO/kg m.s.		
Magnesio total	mg MgO/kg m.s.		
Hierro	mg Fe/kg m.s.		
Parámetros microbiológicos	Unidades	VALOR EN EL SUELO	VALOR EN LOS LODOS
Salmonella ⁴	Presencia o ausencia/25 g		
Escherichia coli ⁴	u.f.c./g		
GESTOR QUE REALIZA LA APLICACIÓN DE LOS LODOS		USUARIO DE LOS LODOS	
Firma:		Firma:	
Fdo.:		Fdo.:	
Fecha:		Fecha:	

FIGURA 3: PLANTILLA DE ALBARÁN DE APLICACIÓN DE LOS LODOS
FUENTE: ORDEN AAA/1072/2013¹²

➤ MUESTREO Y ANALÍTICAS DE LODOS Y SUELOS:

Los lodos serán objeto de muestreo tras su tratamiento, pero antes de la entrega al usuario final. Deberán ser representativos de los lodos producidos. El análisis de los metales pesados se efectuará tras una descomposición mediante un ácido fuerte y el método de referencia de análisis será la espectrometría de absorción atómica⁴.

Las muestras recogidas de los suelos deben ser representativas del total de la superficie sobre la que se van a aplicar los lodos de las estaciones depuradoras. Para ello, el muestreo se realizará normalmente analizando la mezcla de 25 muestras tomadas en una superficie inferior o igual a 5 hectáreas explotada de forma homogénea. Las tomas se efectuarán a una profundidad de 25 cm, salvo si la profundidad del horizonte de laboreo es inferior a ese valor, en cuyo caso, las muestras recogidas no podrán ser inferiores a 10 cm de profundidad⁴.

En ambos casos, los parámetros a analizar serán los correspondientes a los vistos en la figura 3.

➤ NORMATIVA DE APLICACIÓN DE LOS LODOS:

La dosis de lodo a extender sobre el terreno, variará en función de los cálculos de los niveles de nitrógeno mineralizado que puedan ser asimilados por la cosecha, pues la mejor garantía para minimizar la lixiviación de nitrógeno es no sobrepasar la dosis extraída por la

vegetación¹¹. De esta manera, las cantidades orientativas a aportar al terreno serían, en función del cultivo, las que aparecen en la tabla 5.

CULTIVO	N asimilable (Kg/ha y año)	P205 (Kg/ha y año)	K20 (Kg/ha y año)
Cebada	110-150	40-60	80-100
Avena	80-120	30-50	80-100
Trigo	150-200	60-100	50-80

TABLA 5: CANTIDAD ORIENTATIVA DE LAS NECESIDADES DE NUTRIENTES A LOS CULTIVOS
FUENTE: GLOBAL OMNIUM¹¹

Una vez realizada la descarga de los fangos sobre el suelo agrícola, se procederá inmediatamente al laboreo de la parcela para evitar los olores, el impacto visual, la proliferación de insectos y la pérdida de nutrientes, principalmente de nitrógeno, que si se convierte a su forma amoniacal, se desprende a la atmósfera, mermando el aporte de nutricional para los cultivos¹¹.

Quedará prohibido aplicar los lodos tratados, en praderas, pastizales y demás aprovechamientos a utilizar en pastoreo directo por el ganado, con una antelación menor de tres semanas respecto a la fecha de comienzo del citado aprovechamiento directo⁴. Tampoco podrán aplicarse en cultivos hortícolas y frutícolas durante su ciclo vegetativo (con la excepción de los cultivos de árboles frutales) o en un plazo menor de diez meses antes de la recolección y durante la recolección misma, cuando se trate de cultivos hortícolas o frutícolas cuyos órganos o partes vegetativas a comercializar y consumir en fresco estén normalmente en contacto directo con el suelo⁴.

6.2.2. COMPOSTAJE

Según el RD 506/2013, del 28 de junio, sobre productos fertilizantes, el compostaje es el proceso controlado de transformación biológica (mediante microorganismos), aeróbica y termófila, de materiales orgánicos biodegradables que dan lugar a los tipos de abonos y enmiendas orgánicas⁸. Las características propias de los productos del compostaje se detallan en el Anexo I del citado RD:

- Abonos Orgánicos (nitrogenados, fosfatados, NPK, NP, NK)⁸.
- Enmiendas Orgánicas (enmienda orgánica húmica, compost, compost vegetal, compost de estiércol, vermicompost, turbas...)⁸.

En el mismo RD mencionado anteriormente, el compost se define como la enmienda orgánica higienizada y estabilizada, obtenida mediante descomposición biológica aeróbica, con una fase termófila y bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables recogidos separadamente⁸.

Una vez generado el compost a partir de los lodos, puede emplearse al igual que éstos en el sector agrario, aportando nutrientes al suelo, que luego podrán ser utilizados por las especies vegetales que se cultiven en él.

6.2.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

6.2.3.1. BIOGÁS (DIGESTIÓN ANAEROBIA)

La digestión anaerobia es una fase del tratamiento de los lodos en las estaciones depuradoras de aguas residuales en la que tiene lugar una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a biogás (formado principalmente por metano y dióxido de carbono) y a un material estabilizado conocido como fango digerido¹³.

La fase más eficaz de la digestión anaerobia es la hidrólisis térmica, que consiste en aplicar alta presión y temperatura a los lodos durante un cierto periodo de tiempo. Este proceso ocasiona que las moléculas se rompan y se desintegren, siendo más fácilmente degradables por los microorganismos anaerobios que actúan en la siguiente fase¹³. La digestión anaerobia es un proceso ligeramente endotérmico y las etapas en las que sucede y, en las cuales, los fangos reducen su volumen, son:

1. **Hidrólisis.** Se trata de un proceso lento en el que se produce la conversión de los biopolímeros de cadena larga solubles en agua presentes en la materia orgánica (proteínas, hidratos de carbono y grasas) en sus monómeros respectivos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga)^{13,14}. Durante la hidrólisis ya hay producción de CO_2 ¹⁴.
2. **Acidogénesis.** En esta etapa, los monómeros se transportan al interior del microorganismo, para su transformación, de manera relativamente rápida, en ácido acético, productos intermedios (ácidos grasos volátiles...), CO_2 e hidrógeno^{13,14}. Las bacterias responsables de estas dos primeras etapas son las hidrolíticas-acidogénicas, que son anaerobias facultativas. El consumo por parte de las mismas del oxígeno molecular del aire, produce el ambiente anaerobio ideal para su desarrollo^{13,14}. En esta etapa se empiezan a formar H_2S y NH_3 , además de CO_2 ¹⁴.
3. **Acetogénesis.** Los productos originados en la etapa anterior son transformados por las bacterias acetogénicas y homoacetogénicas en ácido acético¹³.
4. **Metanogénesis.** Es la etapa final de la digestión anaerobia. A partir del ácido acético, el CO_2 y el hidrógeno, formados durante la acetogénesis, y gracias a bacterias metanogénicas, se produce metano¹³. El acetato es el principal precursor del metano, alrededor de 70% del metano procede del ácido acético¹³.

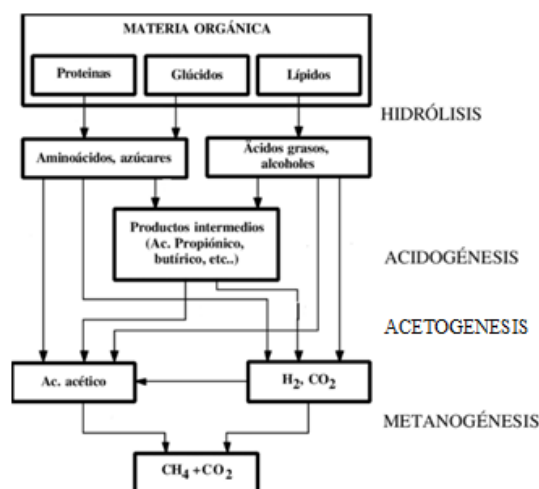


FIGURA 4: ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

FUENTE: ResearchGate¹⁵

Para que las bacterias puedan llevar a cabo estas etapas de la forma más eficaz, es importante que se cumplan los límites establecidos en una serie de parámetros¹³:

- pH: su valor debe estar entre 6,5 y 8,5¹³.
- Temperatura: el rango más usual de temperatura en la digestión anaerobia es entre 25°C y 37°C, tratándose de un régimen mesófilo, pero también se puede operar entre 38°C y 65°C, lo que se conoce como régimen termófilo¹³.

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Biogás por m ³ de lodos (m ³)	Metano por m ³ de biogás (%)	Energía producida biogás (Kwh)	Energía producida metano (Kwh)
Mesofílico	25-37	15-25	0.31	60-65	5.5-6	9.8-10.4
Termofílico	38-65	20-30	0.36	65-70	5.5-6	9.8-10.4

TABLA 6: PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS
FUENTE: SCIELO¹⁶

- Tiempo de retención: es el tiempo medio que los sólidos permanecen en el interior del reactor. Su valor más común oscila entre 30-40 días¹³.
- Sustancias tóxicas e inhibidoras: pueden estar presentes en los fangos antes de su digestión o formarse durante la misma. Reducen el rendimiento de la digestión anaerobia e incluso pueden llegar a desestabilizarla. Por ejemplo, determinadas concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) generan problemas de inhibición de los microorganismos encargados de la digestión de los lodos, especialmente, de las bacterias metanogénicas. Otras sustancias inhibidoras del proceso son el amonio, el ácido sulfúrico o los ácidos grasos de cadena larga¹³.

La digestión anaerobia de los lodos tiene como ventajas la estabilización del residuo obtenido tras el proceso, lo que hace posible su uso para compostaje, abono..., la generación de biogás, que puede emplearse como combustible para calderas y motores de cogeneración en las plantas de tratamiento, y la reducción del volumen de los fangos¹³. La principal desventaja de este proceso es la reducida velocidad de degradación del fango que se da en la fase de hidrólisis, debido a la baja solubilización de la materia orgánica suspendida y a los sólidos orgánicos.

Como hemos visto en la tabla 6, el rendimiento del proceso de digestión anaerobia es de 0,31 metros cúbicos de biogás por cada metro cúbico de lodo en un régimen mesófilo, y un poco mayor en uno termófilo. El biogás contiene un alto porcentaje en metano (CH₄), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible¹⁷. Su poder calorífico es algo superior a la mitad del gas natural y es una energía renovable sustitutiva de energías fósiles, con el inconveniente de su contenido impurezas, que deben ser tratadas, y en H₂S, que en atmósferas oxidantes se transforma en óxidos de azufre y ácido sulfúrico que, además de su efecto perjudicial en la atmósfera, producen corrosión en los equipos¹⁷.

6.2.3.2. CEMENTERAS

El uso de lodos como fuente alternativa de combustible en hornos de cemento, puede abordar el problema de la eliminación segura y respetuosa hacia el medio ambiente de los mismos, siempre y cuando, los gases emitidos sean correctamente depurados y cumplan con la normativa de incineración⁷. Además, la ceniza resultante de la combustión de los lodos, también se aprovecha, incorporándose a la matriz del cemento⁷.

Los lodos de las depuradoras tienen relativamente un alto valor calorífico, así como un factor de reducción de las emisiones de dióxido de carbono en comparación con el carbón, cuando son tratados en un horno de cemento⁷. La industria del cemento representa casi el 5% de las emisiones antropogénicas de CO₂ en todo el mundo. El tratamiento de los residuos municipales en los hornos de cemento puede reducir la dependencia de la industria de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero⁷.

El uso de lodos de depuradora como combustible alternativo en la producción de cemento es una de las opciones más sostenibles para la gestión de lodos. Debido a la alta temperatura en el horno, el contenido de materia orgánica de los lodos de depuradora será completamente destruido⁷.

El valor calorífico de los lodos procedentes de aguas residuales depende del contenido de la materia orgánica y de la humedad de los mismos. Los lodos de depuradora secos con alto contenido orgánico poseen un alto valor calorífico. Es por eso, que el lodo se trata generalmente antes de su eliminación para reducir el contenido de agua, además también, por su propensión a la fermentación y a la aparición de patógenos, haciendo uso de procesos de tratamiento como el engrosamiento, la deshidratación, la estabilización, la desinfección y el secado térmico⁷.

Una limitación importante de este destino para los lodos de EDARs, es que las cementeras tienen como objetivo fabricar cemento y por ello sólo funcionan cuando hay demanda del producto.

6.2.4. INCIERACIÓN

Los lodos de depuradoras de aguas residuales pueden ser incinerados conforme al *Real Decreto 653/2003*, del 30 de mayo¹⁸.

La incineración sin valorización energética es el proceso de eliminación de lodos de depuradora de mayor coste hasta el momento, pero reduce el volumen del fango entre un 70% y un 90%¹⁹. Una vez convertido en cenizas, se puede depositar en vertederos controlados, añadir a masas cerámicas o vitrificar¹⁹.

Este sistema es muy utilizado en Francia, Austria, Dinamarca y Suiza, aunque tiende a la baja¹⁹.

Existen diferentes procesos de incineración en función del horno donde se realice la misma:

- Horno de pisos múltiples: en él, el lodo deshidratado se convierte en cenizas inertes. En este tipo de hornos, las temperaturas más elevadas se consiguen en el piso intermedio, donde se quema el lodo y el combustible auxiliar para calentar el horno. Este tipo de incineración es de gran complejidad, por lo que sólo se suele utilizar en grandes plantas¹⁹.

- Horno de lecho fluidificado: se trata de un cilindro vertical de acero revestido con material refractario que contiene un lecho de arena y orificios para el mantenimiento de la combustión. En él, el lodo, previamente secado, se inyecta y se incinera a una temperatura que puede variar entre 650°C y 980°C¹⁹.

- Horno rotativo: se trata de un cilindro de acero, recubierto en su interior por ladrillos refractarios, que gira impulsado por un motor²⁰.

Debido a los costes que supone esta eliminación de los lodos y al elevado porcentaje de gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera, sin un fin de valorización energética o material, éste destino de los fangos está cada vez en menor proporción con respecto a los anteriormente descritos.

6.2.5. VERTEDERO

Los lodos de depuradoras de aguas residuales pueden ser depositados en vertederos según el *Real Decreto 1481/2001*, del 27 de diciembre¹⁸.

En un vertedero, los lodos se eliminan mediante su depósito subterráneo o en la superficie, por un periodo de tiempo superior al autorizado para el almacenamiento temporal de residuos²¹.

Uno de los grandes problemas que generan los vertederos son los lixiviados. Los lixiviados son los líquidos que discurren a través de los residuos depositados y que rezuman desde ellos o están contenidos en ellos²². Pueden suponer un peligro para el medio ambiente. La composición de los mismos depende del tipo de residuos depositados, de las condiciones climáticas y del tiempo transcurrido desde la formación del depósito²³. Cuanto mayor es el tiempo desde su formación, mayor es la proporción de compuestos orgánicos poco biodegradables. Por lo general, con el transcurso del tiempo, el lixiviado contiene cantidades más elevadas de sustancias orgánicas, metales pesados y una variedad de compuestos hidrosolubles de azufre y nitrógeno, sulfatos y cloruros²³.

7. CONCLUSIÓN

En este trabajo, en el que se exponen y explican los diferentes empleos en los que pueden verse implicados los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), hemos podido conocer, de forma un poco más conjunta, las, actualmente, principales seis aplicaciones de estos fangos, de mayor a menor importancia, según los beneficios que aporta su aprovechamiento o eliminación.

Una vez leída esta revisión bibliográfica, podemos concluir que la aplicación de estos residuos a agricultura es, en la actualidad, el destino con más beneficios tanto ambientales como humanos. Permite simultáneamente deshacerse de este abundante residuo, reusándolo y, a su vez, favorece la composición de los suelos sobre los que se aplica, aportándoles los nutrientes que posteriormente las especies vegetales que se cultiven en ellos podrán utilizar.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. FUNDACIÓN AQUAE [Internet]. Madrid: Encarnación Rodríguez Hurtado; 2018 [consultado 16 mar 2020]. AQUAEXPLORE [¿QUÉ ES UNA DEPURADORA?]. Disponible en: https://www.fundacionaquae.org/aquaexplore/depuradora_html/index.html
2. DE AGUA: TU BLOG DE AGUA [Internet]. Girona: Jordi Puig Caldés; 10 may 2018 [actualizado 27 sep 2018; consultado 19/04/2020]. REJAS DE DESBASTE [¿Cómo funcionan?]. Disponible en: <http://blogdeagua.es/reja-de-desbaste/>
3. EMO: ENVIRONMENT BY TECHNOLOGY [Internet]. Noyal sur Vilaine: EMO; [consultado 19 abr 2020]. PRODUCTOS [Desarenado/Desengrasado]. Disponible en: <https://www.emolatina.es/tecnologia-y-productos-emo-france/desarenado-desengrasado/>
4. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
5. Eco Medio Ambiente: Blog sobre medio ambiente y reciclaje [Internet]. Raquel Ramos; 22 ene 2013 [consultado 18 mar 2020]. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS. Disponible en: <http://ecomedioambiente.com/medio-ambiente/valorizacion-residuos/>
6. ENVIRA: Ingenieros Asesores [Internet]. Llanera: ENVIRA; 19 feb 2019 [consultado 16 mar 2020]. Gestión documental de lodos de depuradora. Disponible en: <https://envira.es/es/gestion-documental-de-lodos-de-depuradora/>
7. Tecnoeraser [Internet]. Paracuellos de Jarama: Tecnoeraser; 16 dic 2013 [consultado 7 abr 2020]. Gestión De Residuos Peligrosos [Reciclaje de lodos industriales y el cemento]. Disponible en: <https://tecnoeraser.es/blog/reciclaje-de-lodos-industriales-y-el-cemento/>
8. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-7540>
9. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [Internet]. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; [consultado 08 may 2020]. INDICADORES AMBIENTALES. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2009/AE_2009_11_09_04.pdf
10. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [Internet]. Madrid: Registro Nacional de Lodos; [consultado 08 may 2020]. RESIDUOS. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2015/TABLAS%20PDF/CAPITULO%2008/pdfc08_10.pdf
11. GLOBAL OMNIUM [Internet]. Valencia: Global Omnium; 10 oct 2013 [consultado 08 may 2020]. Proyecto pionero en la aplicación de fangos de depuradora para fines agrícolas. Disponible en: <https://actualidad.globalomnium.com/proyecto-pionero-en-la-aplicacion-de-fangos-de-depuradora-para-fines-agricolas/>
12. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-6414-consolidado.pdf>
13. TECPA [Internet]. Madrid: TECPA; 29 nov 2019 [consultado 13 abr 2020]. La digestión anaerobia de fangos en EDAR. Disponible en: <https://www.tecpa.es/digestion-fango-edar/>

14. Aqualimpia Engineering e.K. [Internet]. Uelzen: Aqualimpia Engineering e.K.; 08 ago 2017 [consultado 13 abr 2020]. Fases de la digestión anaeróbica. Disponible en: <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>
15. ResearchGate [Internet]. Barcelona: Xavier Flotats; [consultado 13 abr 2020]. Imagen DIGESTIÓN ANAEROBIA. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Fases-de-la-fermentacion-anerobia-y-poblaciones-bacterianas-1-Bacterias_fig2_266218474
16. SCIELO [Internet]. Ensenada: SCIELO; 21 nov 2012 [consultado 08 may 2020]. Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México [Tabla 4]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200006
17. ICOGEN [Internet]. Sitges: ICOGEN; [consultado 13 abr 2020]. Energías renovables [BIOGÁS DE EDAR]. Disponible en: <http://www.icogen-sa.com/energias-renovables/biogas/biogas-de-edar.html>
18. RECYTRANS: Soluciones Globales para el Reciclaje [Internet]. Alboraya: Recytrans; 23 dic 2013 [consultado 18 mar 2020]. Lodos de depuradora. Disponible en: <https://www.recytrans.com/blog/lodos-de-depuradora/>
19. CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [Internet]. Madrid: CEDEX; dic 2013 [consultado 18 abr 2020]. Incineración. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/321/incineracion.html>
20. Vera Carballido J. Horno rotativo (cemento). Estudiante Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Los Materiales. 2012; diapositivas 2-3. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JonathanVeraCarballido/horno-rotativo-cemento>
21. SIGRE: Medicamento y Medio Ambiente [Internet]. Madrid: SIGRE; 2020 [consultado 13 abr 2020]. DICCIONARIO [VERTEDERO]. Disponible en: <https://www.sigre.es/diccionario/vertedero/>
22. COGERSA [Internet]. Asturias: COGERSA; 2011 [consultado 13 abr 2020]. Tratamientos de lixiviados [primer párrafo]. Disponible en: <https://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19173>
23. DAS: Environmental Experts [Internet]. Dresden: DAS; [consultado 08 may 2020]. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO. Disponible en: <https://www.das-ee.com/es/tratamiento-de-efluentes/sectores/lixivados-de-vertedero/>