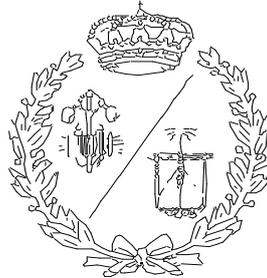


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LODOS DE  
UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS  
RESIDUALES INDUSTRIALES**

**(Sludge management alternatives from an  
industrial wastewater treatment plant)**

Para acceder al Título de  
**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Autora: Ana Aller Díaz**

**Julio – 2023**

**Título:** Alternativas de gestión de lodos de una estación depuradora de aguas residuales industriales

**Autor:** Ana Aller Díaz

**Directores:** Javier Rufino Viguri Fuente y Marta Revilla Salas

**Palabras clave:** lodos de depuradora, alternativas de gestión, economía circular, medioambiente, compostaje, conversión de energía, depósito en vertedero.

**Resumen:** Las plantas de tratamiento de lodos y lixiviados industriales generan una importante cantidad de lodos como residuos finales de proceso. Los tratamientos físico – químicos son los más comúnmente utilizados, generando un residuo sólido que es necesario gestionar y una corriente líquida cuyo tratamiento biológico a su vez genera una corriente líquida ya depurada y un nuevo residuo sólido que igualmente es necesario gestionar. Ambos residuos sólidos, con catalogación diferenciada en la Lista Europea de Residuos, procedentes de una etapa final de prensado, se denominan lodos procedentes de tratamiento de aguas residuales industriales y lodos procedentes de tratamiento biológico de aguas residuales industriales.

El objetivo del presente trabajo es la síntesis, análisis y potencial evaluación de alternativas para dichos lodos procedentes de una planta industrial. Dado que se trata en ambos casos de residuos no peligrosos, se pretende obtener una alternativa de gestión para estos residuos analizando todas las posibilidades para reintroducirlo en los procesos productivos a través del concepto de la economía circular y evitando su depósito en vertederos. Esto se realiza teniendo en cuenta aspectos medioambientales, técnicos, económicos y su viabilidad para una posible implementación a nivel industrial.

**Title:** Sludge management alternatives from an industrial wastewater treatment plant

**Author:** Ana Aller Díaz

**Supervisors:** Javier Rufino Viguri Fuente and Marta Revilla Salas

**Keywords:** sewage sludge, management alternatives, circular economy, environment, composting, energy conversion, landfill.

**Abstract:** Industrial sludge and leachate treatment plants generate a significant amount of sludge as final process residues. Physical-chemical treatments are the most widely used, generating a solid waste that needs to be managed and a liquid stream whose biological treatment in turn generates an already purified liquid stream and a new solid waste that also needs to be managed. Both solid waste, with different code in the UE List of Wastes, come from a final pressing stage, they are called sludge from industrial wastewater treatment and sludge from biological treatment of industrial wastewater.

The objective of this project is the synthesis, analysis and potential evaluation of alternatives for sludges from an industrial plant. Since it is non-hazardous waste in both cases, it is intended to obtain a management alternative for this waste by analyzing all the possibilities to reintroduce it into production processes through the concept of the circular economy and avoiding its deposit in landfills. This is done taking in account the environmental, technical, economic aspects and its feasibility for a possible implementation in the industry.

## Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
1.1. GENERACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA .....	12
1.2. SITUACIÓN EN ESPAÑA.....	13
1.3. SITUACIÓN EN CANTABRIA.....	14
1.4. CARACTERIZACIÓN DE LODOS .....	15
<b>2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES</b> <b>17</b>	
2.1. PROCESO DE TRATAMIENTO .....	17
2.2. RESIDUOS TRATADOS POR LA EDARI.....	23
2.3. CANTIDAD DE RESIDUOS QUE SE TRATAN.....	25
<b>3. POSIBLES ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LODOS DE DEPURADORA</b> <b>29</b>	
3.1. APLICACIÓN A SUELOS .....	30
3.1.1. COMPOSTAJE.....	32
3.1.2. SECTOR AGRARIO.....	33
3.1.3. FERTILIZANTES.....	44
3.2. CONVERSIÓN DE RESIDUOS EN ENERGÍA .....	58
3.2.1. PIRÓLISIS.....	60
3.2.2. COMBUSTIÓN / INCINERACIÓN .....	62
3.2.3. GASIFICACIÓN.....	64
3.2.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	64
3.3. DEPÓSITO EN VERTEDERO .....	66
3.3.1. RESIDUOS INERTES .....	67

3.3.2. RESIDUOS NO PELIGROSOS.....	69
3.4. ADICIÓN DE CAL.....	70
3.5. OTROS MÉTODOS DE GESTIÓN.....	71
3.6. ANÁLISIS COMPARATIVO PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS Y ENFOQUE ACTUAL DE LAS PLANTAS EDAR Y EDARI.....	72
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tratamiento de aguas residuales industriales y generación de lodos.....	12
Figura 2 - Porcentaje del número de EDARS por Comunidades Autónomas .....	13
Figura 3 - Porcentaje de producción de lodos por Comunidades Autónomas.....	13
Figura 4 - Porcentaje del destino final de los lodos.....	14
Figura 5 - Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de Oxital .....	22
Figura 6 - Comparativa de cantidades de lodos por código LER .....	27
Figura 7 - Comparativa de cantidades de lixiviados por código LER .....	28
Figura 8 - Cantidad total de lodos y lixiviados .....	29
Figura 9 - Esquema de las alternativas de gestión .....	30
Figura 10 - Legislación aplicable a la gestión de lodos de depuradora mediante aplicación en el sector agrario y como fertilizante.....	32
Figura 11 - Principales características del Real Decreto 1310/1990 en cuanto a la caracterización del lodo de depuradora .....	44
Figura 12 - Valores límite de concentración de metales pesados de Real Decreto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013 (a. Escala decimal; b. Escala logarítmica) .....	54
Figura 13 - Caracterización del lodo para uso como Enmienda orgánica – Compost .....	56
Figura 14 - Principales características del proceso de compostaje de lodos de depuradora.....	56
Figura 15 - Características del producto final de compostaje.....	57
Figura 16 - Características del suelo destino del compost obtenido .....	58
Figura 17 - Esquema de las posibilidades de conversión en energía .....	60
Figura 18 - Proceso de pirólisis lenta .....	61
Figura 19 - Proceso de pirólisis rápida .....	61
Figura 20 - Proceso de combustión / incineración .....	63
Figura 21 - Proceso de gasificación .....	64

Figura 22 - Proceso de digestión anaerobia.....	65
Figura 23 – Diagrama de la instalación de recuperación de residuos de aguas residuales.....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Producción y gestión de lodos en Cantabria según el Decreto 14/2017 ...	15
Tabla 2 - Parámetros agronómicos para la caracterización de los lodos .....	16
Tabla 3 - Metales pesados para la caracterización de los lodos .....	16
Tabla 4 - Parámetros microbiológicos para la caracterización de lodos .....	16
Tabla 5 – Grupos compuestos orgánicos para la caracterización de lodos .....	17
Tabla 6 - Cantidad de lodos por código LER.....	26
Tabla 7 - Cantidad de lixiviados por código LER.....	28
Tabla 8 - Valores de concentración de metales pesados en suelos según la Directiva 86/278 (Anexo A) .....	34
Tabla 9 – Valores de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura según la Directiva 86/278 (Anexo II B).....	35
Tabla 10 - Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años según la Directiva 86/278 (Anexo I C) .....	36
Tabla 11 - Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el Real Decreto 1310/1990.....	38
Tabla 12 - Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria según el Real Decreto 1310/1990 .....	39
Tabla 13 - Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años .....	40
Tabla 14 - Resumen de Orden AAA/1072/2013.....	41
Tabla 15 - Reglamento 2019/1009 - CFP 1: Abono o fertilizante; CFP 1 (A)(I): Abono orgánico sólido .....	46
Tabla 16 - Reglamento 2019/1009 - CFP 3: Enmienda del suelo - CFP 3 (A): Enmienda orgánica .....	48
Tabla 17 - Características del producto según el Real Decreto 506/2013 .....	51

Tabla 18 - Valores límite de concentración de microorganismos según el Real Decreto 506/2013 .....	52
Tabla 19 - Valores límite de concentración de metales pesados según el Real Decreto 506/2013 .....	52
Tabla 20 - Valores límite de concentración de metales pesados de Real Decreto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013.....	55
Tabla 21 - Valores límite de lixiviación para los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes según el Real Decreto 646/2020.....	68
Tabla 22 - Valores límite de contenido total de parámetros orgánicos para los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes según el Real Decreto 646/2020 ...	69
Tabla 23 – Valores límite de concentración para los residuos no peligrosos admisibles en el vertedero para residuos no peligrosos según el Real Decreto 646/2020 .....	70
Tabla 24 - Resumen de las ventajas y desventajas de las posibles alternativas de gestión de lodos EDARI .....	73

## 1. INTRODUCCIÓN

En las ciudades se producen grandes cantidades de aguas residuales, las cuales son tratadas generalmente en plantas de tratamiento conocidas como EDAR (estación depuradora de aguas residuales). Así mismo la industria genera aguas residuales que es necesario tratar en estaciones depuradoras de aguas residuales industriales (EDARI). Estas estaciones utilizan diferentes procesos, tanto físico-químicos como biológicos y/o combinación de ellos con diferentes intensidades en sus tratamientos (Sugurbekova et al., 2023). Por lo tanto, los lodos de depuradora se pueden definir como un subproducto semisólido residual generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales en instalaciones industriales o municipales (Paranjpe et al., 2023). Estos lodos representan aproximadamente un 2 % del volumen de las aguas residuales tratadas.

La cantidad de lodos generados se encuentra en continuo crecimiento, y actualmente constituye un grave problema ambiental a nivel global. En algunos casos, la eliminación incontrolada de los lodos de depuradora ha generado problemas. Por este motivo es necesario un sistema de gestión de los lodos. Cada país tiene el suyo propio, el cual está regulado por la legislación nacional, y pueden contar con convenios internacionales que permitan el movimiento transfronterizo de los residuos.

Los principales métodos de eliminación de los lodos de depuradora empleados son su utilización en agricultura, su aprovechamiento energético directo y/o indirecto ('Waste-To-Energy') y el depósito en vertedero. Sin embargo, esto depende de las características socioeconómicas y geológicas de cada país. En general, el 90 % de los lodos se emplean en la producción agrícola, con un promedio de entre el 30 y el 40 % en Europa Occidental, y al menos el 60 % en Estados Unidos (Sugurbekova et al., 2023).

Respecto a la Unión Europea, su objetivo principal es apoyar la aplicación de los lodos de depuradora en la agricultura, cuyos requisitos vienen dados por la *Directiva 86/278/EEC, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura*. Actualmente, esta aplicación de eliminación de lodos representa el 42,4 %; seguido de la incineración, 26,9 %; depósito en vertedero, 13,6 % y otros, 17,1 %, entre los que

se encuentran el compostaje, el almacenamiento y la recuperación de terrenos (Sugurbekova et al., 2023).

Entre estas aplicaciones, la Unión Europea considera el vertido de lodos como el último recurso (Directiva 2008/98/CE). De hecho, de 2010 a 2020, el porcentaje de lodos vertidos disminuyó del 11 % al 4 % (Raheem et al., 2018).

Otra medida tomada por la Unión Europea es la creación de un plan de acción de economía circular, promoviendo la gestión sostenible de los materiales de desecho. Si los desechos se convierten en un recurso útil, se devolverán a la economía en forma de materia prima con otra aplicación. En este caso, la prioridad sería la reutilización y el reciclaje. La Comisión Europea propone un plan de sostenibilidad para los biorresiduos, donde una de las alternativas es convertir los lodos de depuradora en energía calorífica y electricidad, produciendo combustibles avanzados (Comisión Europea, 2019).

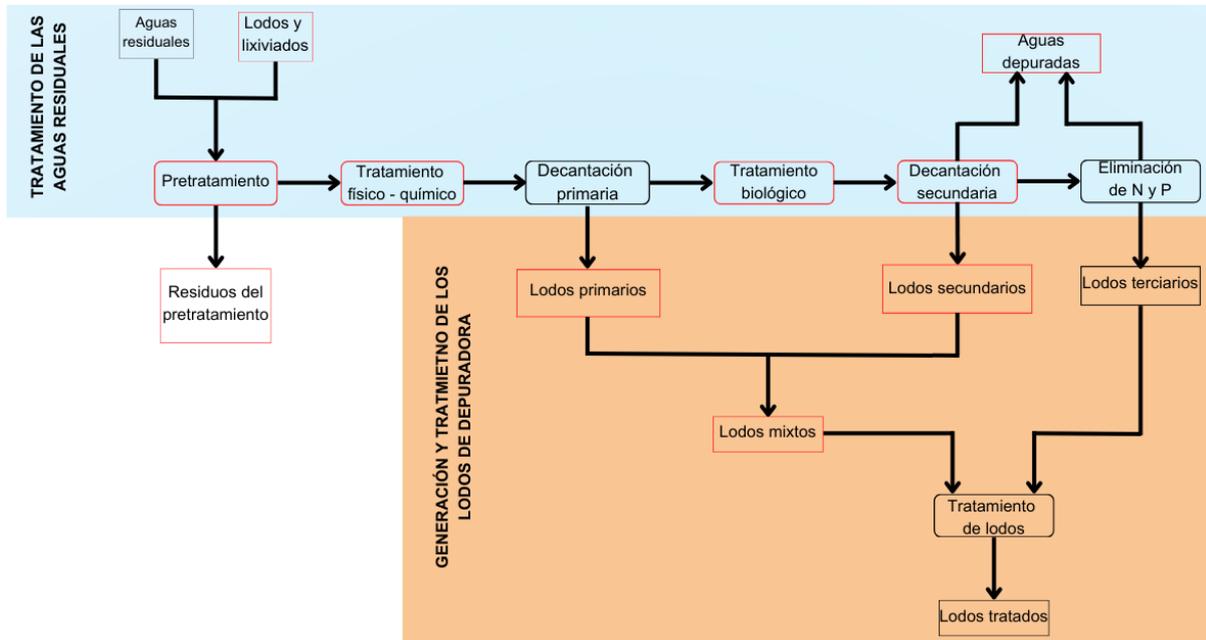
Dentro del concepto de economía circular, destaca la reutilización de residuos orgánicos como enmiendas de suelo (Urra et al., 2019), ya que se trata de un enfoque realista, asequible y rentable y que, además, es una alternativa con respeto hacia el medio ambiente.

Otro aspecto destacable en relación con el medio ambiente es la necesidad de lograr ciertos objetivos de sostenibilidad, entre los que se encuentra el uso de residuos biodegradables de los sectores doméstico, industrial y comercial, para conseguir el desarrollo de industrias libres de residuos y prevenir la producción masiva de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por último, además de la agricultura, el depósito en vertedero y la incineración, existen otras alternativas para llevar a cabo la gestión de los lodos de depuradora: la producción de materiales de construcción o biocombustibles. La principal diferencia entre todas estas opciones es su rentabilidad y el potencial efecto negativo que producen sobre el medioambiente, siendo en algunos casos muy relevante.

## 1.1. GENERACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA

En la figura 1 se muestra un esquema en el cual se resumen las etapas de tratamiento de las aguas residuales industriales y la generación y tratamiento de los lodos de depuradora.



**Figura 1** - Tratamiento de aguas residuales industriales y generación de lodos

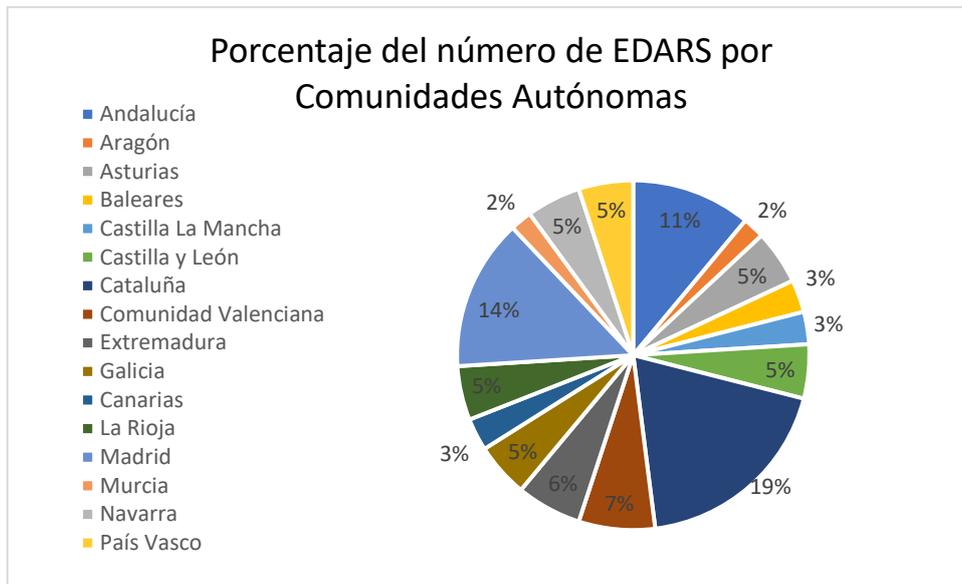
Respecto al tratamiento de las aguas residuales, es necesario un pretratamiento, del cual se extraen los primeros residuos. Tras el pretratamiento, las aguas residuales son sometidas a un tratamiento físico – químico, una decantación primaria, un tratamiento biológico y una decantación secundaria. En algunos casos también es necesario realizar una eliminación de nitrógeno y fósforo. Una vez realizados los dos últimos procesos se consigue agua depurada.

De la decantación primaria se obtienen los lodos primarios; mientras que a partir de la decantación secundaria se consiguen los lodos secundarios. Si estos lodos se mezclan se denominan lodos mixtos. También existe la posibilidad de obtener lodos terciarios tras la eliminación de nitrógeno y fósforo. Todos estos lodos requieren un tratamiento final y pasarán a considerarse lodos tratados.

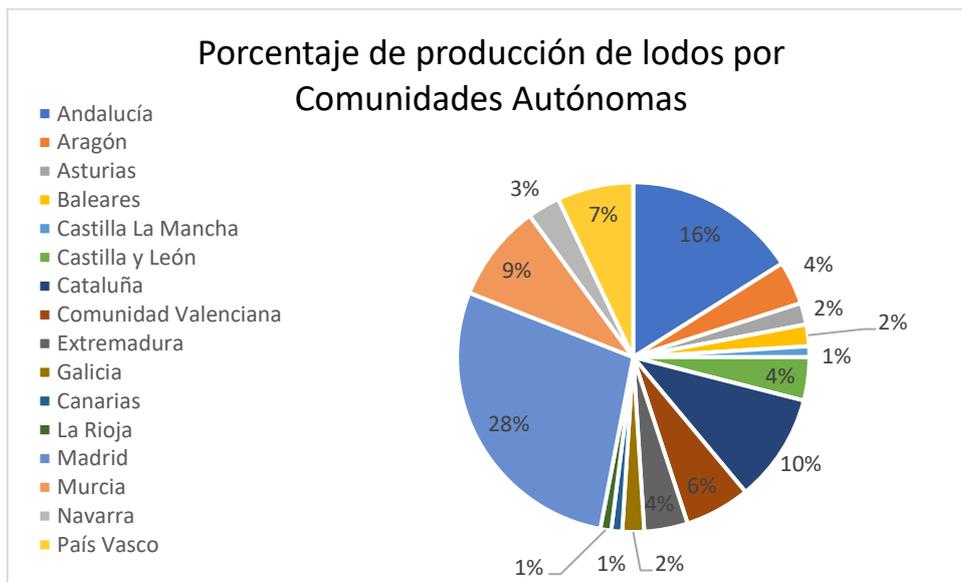
## 1.2. SITUACIÓN EN ESPAÑA

En España se realizó un estudio sobre la caracterización de los lodos de depuradora generados. En dicho estudio se recoge información sobre la composición de los lodos generados en las diferentes estaciones depuradoras de aguas residuales, además de los tratamientos más habituales (Ortega, 2009).

Por un lado, muestra la relación entre la cantidad de estaciones depuradoras de aguas residuales de cada una de las comunidades (Figura 1) y el porcentaje de producción de lodos por Comunidades Autónomas (Figura 2).



**Figura 2** - Porcentaje del número de EDARS por Comunidades Autónomas



**Figura 3** - Porcentaje de producción de lodos por Comunidades Autónomas

Observando las figuras 1 y 2, la Comunidad Autónoma que genera mayor cantidad de lodos es Madrid, aunque no es la comunidad con mayor número de EDARS. La comunidad con mayor número de estaciones depuradoras es Cataluña, a pesar de solo producir el 10 % de los lodos de toda España.

En este estudio también aparecen definidos los posibles destinos finales de los lodos generados (Figura 4) hasta la fecha de realización del estudio. El principal destino fue la aplicación al suelo, sobre todo para agricultura y jardinería. El segundo destino fue el depósito en vertedero. Otra posibilidad, aunque con menor presencia, es la incineración y, dentro de otros, se contabilizan aquellos lodos que se destinaron a cementeras y aquellos que no se ha podido averiguar su destino final.



**Figura 4** - Porcentaje del destino final de los lodos

### 1.3. SITUACIÓN EN CANTABRIA

De los datos oficiales disponibles, entre los años 2010 y 2014 la empresa pública encargada de la gestión de los lodos fue MARE (Medio ambiente, Agua, Residuos y Energía). Esta empresa gestionó una cantidad total de 15.242 toneladas de lodos; mientras que otros gestores gestionaron 233 toneladas (Directiva, 2017). Los destinos finales de estos lodos fueron en su mayoría para agricultura, y una pequeña parte para depósito en vertedero (Tabla 1).

**Tabla 1** - Producción y gestión de lodos en Cantabria según el Decreto 14/2017

Años	Cantidad de lodos totales (Toneladas)	Aplicación agrícola (%)	Depósito en vertedero (%)
2010	24.339	99,45	0,55
2011	21.884	99,39	0,61
2012	16.138	99,20	0,80
2013	17.779	98,98	1,02
2014	15.475	98,50	1,50

#### 1.4. CARACTERIZACIÓN DE LODOS

Los lodos de depuradora son un residuo biodegradable procedente de las aguas residuales tras su tratamiento en una planta depuradora EDAR o EDARI. Estos residuos se caracterizan por tener una composición no uniforme (Hušek et al., 2022) debido a las diferentes características de su origen condicionadas por las características particulares de las aguas a tratar. Esto complica su gestión y hace necesaria la existencia de una ley que lo regule.

Principalmente se caracterizan por un alto contenido en materia orgánica, aunque también presentan otro tipo de sustancias, como pueden ser nutrientes, patógenos, nitrógeno, fósforo y metales pesados (An-nori et al., 2022). Además de esto, los lodos contienen una amplia gama de sustancias domésticas e industriales que son contaminantes: residuos de medicamentos, contaminantes orgánicos (COP), incluidas dioxinas y furanos, o microplásticos (MP) (Elskens et al., 2013; Hassan et al., 2023). En función de la cantidad existente de estas sustancias se pueden reflejar los hábitos de consumo, el diseño de la infraestructura o la deposición atmosférica (Kirchmann et al., 2017).

En función del origen, de la calidad de las aguas residuales y del sistema de tratamiento, los lodos son conocidos por tener una composición físicoquímica heterogénea y con un alto contenido en agua.

Dado que una de las vías de gestión más utilizada para los lodos de depuradora es su aplicación en suelos agrícolas, los parámetros necesarios para la caracterización de lodos destinados a esta utilización se pueden agrupar en cuatro grandes grupos. Las características requeridas para cada uno de ellos en España (Ortega, 2009) se resumen en las tablas 2, 3, 4 y 5:

**Tabla 2** - Parámetros agronómicos para la caracterización de los lodos

Parámetros agronómicos	
pH	Conductividad
Carbono total	Materia orgánica oxidable
Nitrógeno total	Relación C/N
Fósforo total y asimilable	Calcio total y asimilable
Magnesio total y asimilable	Potasio total y asimilable
Hierro total y asimilable	Sodio asimilable

**Tabla 3** - Metales pesados para la caracterización de los lodos

Metales pesados	
Cadmio	Cromo
Níquel	Mercurio
Plomo	Zinc
Cobre	

**Tabla 4** - Parámetros microbiológicos para la caracterización de lodos

Parámetros microbiológicos	
Escherichia coli	Salmonella spp
Coliformes totales	Coliformes fecales

**Tabla 5** – Grupos compuestos orgánicos para la caracterización de lodos

<b>Compuestos orgánicos</b>	
Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX)	LAS
Di(2-etilhexil)ftalato (DEHP)	Etoxilatos de nonilfenol (NPE)
Hidrocarburo Aromático Policíclico (PAH)	Bifenilos Policlorados (PCB)
Dibenzodioxinas / Dibenzofuranos policlorados (PCDD/F)	Polibromodifenil éteres (PBDE)

## **2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

Oxital es una empresa dedicadas a los servicios de gestión medioambiental ubicada en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Entre estos servicios, destaca la gestión de residuos y lixiviados de vertederos.

La planta de tratamiento de lodos y lixiviados de Residuos No Peligrosos se ubica en Guarnizo y cuenta con la Autorización Ambiental Integrada AA/018/2006 emitida por la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria para el tratamiento de 720 toneladas de residuos por día. Esta es la planta de interés para el desarrollo del presente proyecto.

### **2.1. PROCESO DE TRATAMIENTO**

El tratamiento de lodos y lixiviados que se realiza en la planta de Oxital está compuesto, principalmente, por tres fases: pretratamiento de desbaste de gruesos, tratamiento primario físico - químico y, por último, tratamiento biológico secundario (Figura 5).

En función de la procedencia de los residuos, éstos se separan en dos líneas para proceder a su tratamiento: línea de lodos y línea de lixiviados. Ambas comparten gran

parte del proceso, pero su principal diferencia es que los lixiviados necesitan un primer tratamiento físico – químico.

## 1. Línea de tratamiento de lodos

### 1.1. Pretratamiento de desbaste de gruesos

Los camiones cisterna que contienen los lodos descargan los residuos en el **desbaste de gruesos** para realizar el pretratamiento (código verde). El objetivo del desbaste de gruesos es retener los sólidos de tamaño superior a 12 mm. Para ello, se hace pasar el lodo que llega a la planta por una reja de luz de paso de 12 mm. Se emplea para optimizar el proceso del tratamiento completo, ya que estos sólidos podrían provocar problemas en las siguientes unidades de operación de la planta, como obstrucciones en las tuberías.

Los sólidos separados (> 12 mm) pasan a ser residuos finales y se envían directamente a un **contenedor de residuos finales** (código morado).

### 1.2. Tratamiento primario físico – químico

La principal función del tratamiento primario es eliminar los sólidos que se encuentran presentes en el agua residual. Para ello, el residuo sin sólidos gruesos se envía al **espesador de lodo 1** (código verde). En esta unidad, debido a la acción de la gravedad, se crea una interfase entre la parte líquida y la sólida.

- La fracción sólida se deposita en la parte inferior del espesador y se envía al **depósito mezcla 1** (código verde), donde se realiza el tratamiento físico – químico. Este tratamiento consiste en añadir una serie de compuestos con diferentes objetivos. En primer lugar, se añade un coagulante ( $FeCl_3$ ), para desestabilizar las cargas de los sólidos, y un polielectrolito aniónico (floculante), para aglomerar los sólidos desestabilizados en sólidos de mayor tamaño. Esto último se realiza para poder decantar por efecto de la gravedad. Por último, el tercer compuesto que se añade es cal hidratada ( $Ca(OH)_2$ ) para inertizar los lodos resultantes.

Mediante la adición de estos tres químicos, en la siguiente fase del proceso, se consigue una mayor deshidratación del lodo y se obtienen sequedades

superiores al 60 %. Esta fase consiste en enviar el lodo a un **filtro prensa**. Se trata de un dispositivo cuyo principal objetivo es separar los líquidos y los sólidos por una filtración a presión. Una vez finalizado este proceso, las tortas de lodo resultantes se depositan en un contenedor.

El residuo generado se denomina primario, ya que su tratamiento ha sido primario no biológico. Por este motivo, pertenece al código LER (Lista Europea de Residuos) 190814 ('Lodos procedentes de otros tratamiento de aguas residuales industriales distintos de los especificados en el código 190813\*', siendo 190813\* el código correspondiente a 'Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, que contienen sustancias peligrosas').

- La fracción líquida queda en la parte superior del espesador (sobrenadante) y se envía al **depósito mezcla 2** (código verde) para someterse a otro tratamiento físico – químico. Esto se realiza para mejorar su calidad antes de tratarlo en el reactor biológico, ya que en dicho reactor se elimina el material soluble pero no el particulado (sólido).

El tratamiento que se realiza en esta unidad consiste en separar los sólidos pequeños restantes y coloidales. Para conseguir la separación, se añade un coagulante ( $FeCl_3$ ) y un floculante (polielectrolito aniónico). La parte sólida que se obtiene una vez finalizado el tratamiento se vuelve a enviar al **espesador 1** (código amarillo); mientras que la fase líquida (código azul) se manda al tratamiento secundario para degradar los compuestos solubles mediante microorganismos.

### 1.3. Tratamiento secundario biológico.

La fracción líquida obtenida del **depósito mezcla 2**, del escurrido **filtro prensa** y de los **depósitos almacén**, se trata en el **reactor biológico** (código azul) como fuente de alimento para los microorganismos que se desarrollan en el ecosistema artificial del reactor biológico. Antes de esto, pasa por un proceso de **homogeneización**. Esta fracción líquida aporta la materia orgánica que se degrada por acción del metabolismo microbiano en el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Cuanta mayor materia orgánica soluble se aporte, mayor cantidad de biomasa o lodo secundario se forma en el reactor biológico.

Para que el reactor biológico mantenga su funcionamiento de manera constante, se introduce oxígeno mediante el aporte de aire a través de **soplantes** (código gris). Estos dispositivos están regulados de manera automática, de forma que cuando se detecta que el valor de oxígeno del licor mezcla (biomasa) en el reactor biológico disminuye por debajo de la consigna 'set point' de  $O_2$  (mg/L), añadan la cantidad de aire necesaria para alcanzar dicha consigna.

#### 1.4. Tratamiento de decantación secundaria.

Es necesario separar la biomasa o lodo secundario del agua depurada. Esta separación se realiza en un **decantador secundario** mediante la acción de la gravedad. De esta manera, la biomasa queda en el fondo del decantador y el agua en la parte superior. Esta agua se envía directamente a un colector de saneamiento (código azul).

Por otro lado, se debe controlar la población microbiana de la biomasa obtenida. Para ello, se realiza una extracción del **decantador secundario** para purgar el lodo secundario biológico (código marrón). Este lodo biológico se envía al **espesador 2** y se trata en el **depósito mezcla 1**. En esta unidad se puede tratar tanto lodo primario como lodo secundario biológico. El lodo procedente del decantador secundario del tratamiento biológico se lleva a filtro prensa, generando un lodo biológico de código LER 19 08 12 ('Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales, distintos de los especificados en el código 19 08 11\*'), donde el código 19 08 11\* corresponde a 'Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales, que contienen sustancias peligrosas'.

### 2. Línea de tratamiento de lixiviados

#### 2.1. Pretratamiento de desbaste de gruesos

Los camiones cisterna que contienen los lixiviados a tratar tienen diferentes posibilidades para descargarse. Por un lado, los lixiviados se pueden depositar en el **tanque almacén** (código amarillo), cuyo principal objetivo es el de almacenar dichos residuos, aunque si las condiciones lo requieren, también se podría realizar el tratamiento primario físico – químico en él. Por otro lado, las opciones existentes son

los **depósitos almacén** o el **depósito mezcla 2** (código amarillo), donde se realiza directamente el tratamiento primario físico – químico.

En el tratamiento de lixiviados en vez de reja de gruesos que sería innecesaria, la instalación dispone de filtros de finos en las tuberías de descarga (6 mm).

## 2.2. Tratamiento primario físico – químico

El tratamiento consiste en añadir una serie de compuestos para mejorar la calidad del líquido antes de tratarlo en el reactor biológico, separando los sólidos pequeños y coloidales. Estos compuestos son un coagulante ( $FeCl_3$ ) y un floculante (polielectrolito aniónico).

Una vez realizado este tratamiento, la parte sólida se envía al **espesador 1**, donde se trata con los residuos primarios procedentes de los lodos; mientras que la fracción líquida es enviada al tratamiento secundario para degradar los compuestos solubles mediante microorganismos.

## 2.3. Tratamiento secundario biológico

Esta parte del proceso coincide con lo explicado en el tratamiento secundario biológico de la línea de tratamiento de lodos.

## 2.4. Tratamiento de decantación secundaria

Al igual que el apartado anterior, este proceso está explicado en el tratamiento de decantación secundaria correspondiente a la línea de lodos.

La EDARI puede funcionar de manera flexible con las dos líneas de tratamiento individualizadas: línea de tratamiento de lodos y línea de tratamiento de lixiviados o de manera mezclada.

Todo el proceso descrito se muestra el diagrama de flujo de la figura 5:

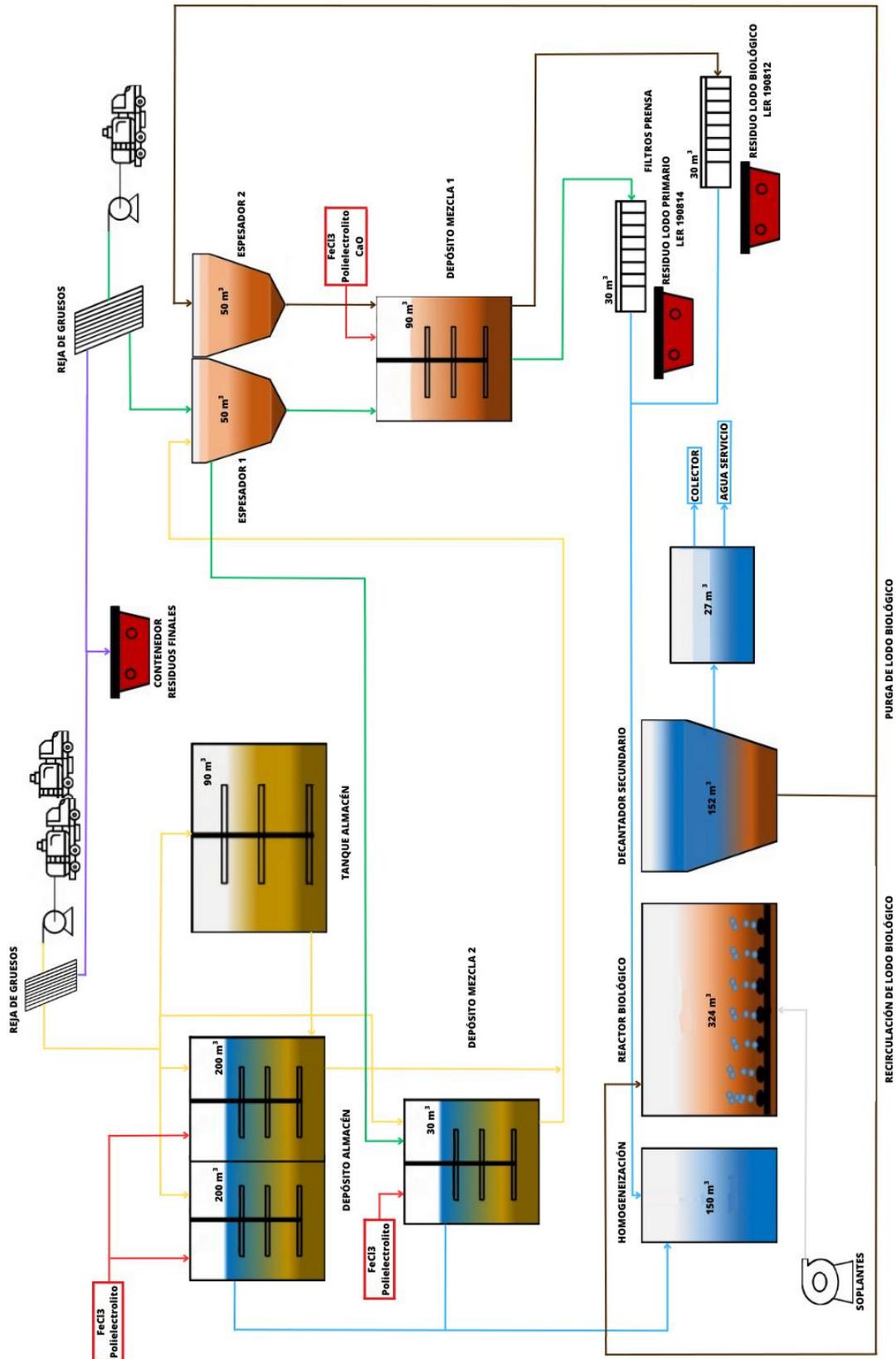


Figura 5 - Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de Oxital

## 2.2. RESIDUOS TRATADOS POR LA EDARI

Los residuos tratados en la planta de Oxital son los procedentes de diferentes clientes. Por este motivo, existen distintos tipos de residuos, los cuales se pueden catalogar siguiendo la Lista Europea de Residuos, los códigos LER. Esta clasificación se realiza en función del origen, teniendo en cuenta la fuente generadora y el proceso de generación, y su naturaleza.

Todos estos residuos comparten una característica fundamental que se debe tener en cuenta a la hora de llevar a cabo su gestión, se trata de residuos no peligrosos.

En cuanto a los **lodos** de entrada en la planta, se tienen los siguientes códigos LER, autorizados mediante la correspondiente Autorización Ambiental Integrada (AAI/018/2006, 2008):

- 02. Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos
  - 02 01 – Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca
    - 02 01 01 – Lodos de lavado y limpieza
    - 02 01 06 – Heces de animales, orina y estiércol (incluida paja podrida) y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan
  - 02 02 – Residuos de la preparación y elaboración de carne, pescado y otros alimentos de origen animal
    - 02 02 01 – Lodos de lavado y limpieza
    - 02 02 04 – Lodos del tratamiento in situ de efluentes
    - 02 02 99 – Residuos no especificados en otra categoría
  - 02 05 – Residuos de la industria de productos lácteos
    - 02 05 01 – Materiales inadecuados para el consumo o elaboración
    - 02 05 02 – Lodos del tratamiento in situ del efluente
  - 02 07 – Residuos de la producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas (excepto café, té y cacao)
    - 02 07 01 – Residuos del lavado, limpieza y reducción mecánica de materias primas
    - 02 07 04 – Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
- 10. Residuos de procesos térmicos
  - 10 01 – Residuos de centrales eléctricas y otras plantas de combustión (excepto capítulo 19)

- 10 01 21 – Lodos del tratamiento in situ de efluentes distintos de los especificados en el código 10 01 20
- 16. Residuos no especificados en otro capítulo de la lista
  - 16 10 – Residuos líquidos acuosos destinados a plantas de tratamiento externas
    - 16 10 02 – Residuos líquidos acuosos distintos a los especificados en el código 16 10 01 (16 10 01\* - Residuos líquidos acuosos que contienen sustancias peligrosas)
- 18. Residuos de servicios médicos o veterinarios o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de la prestación de cuidados sanitarios)
  - 18 02 – Residuos de la investigación, diagnóstico, tratamiento o prevención de enfermedades de animales.
    - 18 02 03 – Residuos cuya recogida y eliminación no es objeto de requisitos especiales para prevenir infecciones
- 19. Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial.
  - 19 05 – Residuos del tratamiento aeróbico de residuos sólidos
    - 19 05 99 – Residuos no especificados en otras categorías
  - 19 06 - Residuos del tratamiento anaeróbico de residuos
    - 19 06 03 – Licores del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
    - 19 06 04 – Lodos de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
    - 19 06 06 – Lodos de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos animales y vegetales
  - 19 08 – Residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales no especificados en otra categoría
    - 19 08 05 – Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas
    - 19 08 14 – Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales distintos a los especificados en el código 19 08 13 (19 08 13\* - Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, que contienen sustancias peligrosas)
  - 19 09 – Residuos de la preparación de agua para consumo humano o agua para uso industrial
    - 19 09 02 – Lodos de la clarificación del agua

- 20. Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas en las fracciones recogidas selectivamente.
  - 20 03 – Otros residuos municipales
    - 20 03 03 – Residuos de la limpieza viaria
    - 20 03 04 – Lodos de fosas sépticas
    - 20 03 06 – Residuos de la limpieza de alcantarillas

Por otro lado, los **lixiviados** de entrada son:

- 19. Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial.
  - 19 05 – Residuos del tratamiento aeróbico de residuos sólidos
    - 19 05 99 – Residuos no especificados en otras categorías
  - 19 07 – Lixiviados de vertedero
    - 19 07 03 – Lixiviados de vertedero distintos de los especificados en el código 19 07 02 (19 07 02\* – Lixiviados de vertedero que contienen sustancias peligrosas)

### 2.3. CANTIDAD DE RESIDUOS QUE SE TRATAN

Se puede realizar un análisis de los residuos que se tratan a partir de los datos aportados por Oxital. Estos datos corresponden a los lodos y lixiviados que se recibieron en los años 2021 y 2022. Con objeto de salvaguardar la confidencialidad de los datos de la empresa, todos estos datos vienen multiplicados por un factor de normalización.

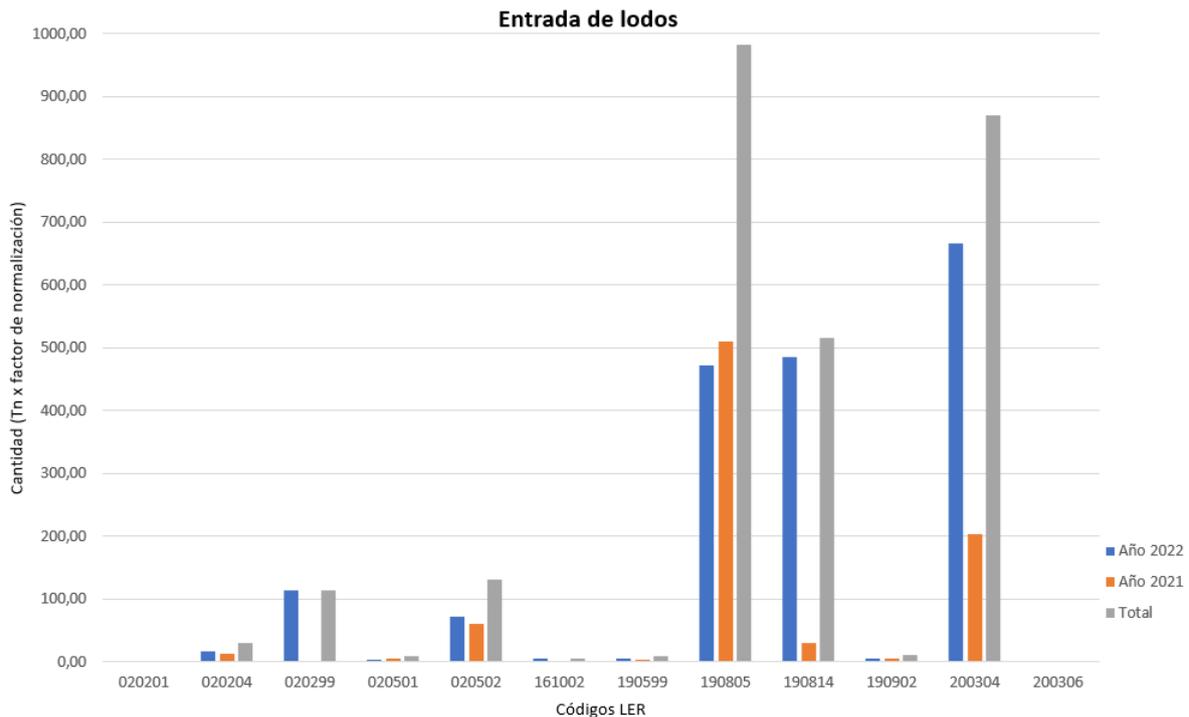
Respecto a los lodos, las cantidades recibidas por código LER en los años 2021 y 2022 son las siguientes (Tabla 6):

**Tabla 6** - Cantidad de lodos por código LER

Código LER	Cantidad (Tn x factor normalización)	
	Año 2022	Año 2021
02 02 01	0,00	0,47
02 02 04	16,41	13,53
02 02 99	114,06	0
02 05 01	3,04	5,35
02 05 02	71,04	59,41
16 10 02	5,14	0
19 05 99	5,86	3,7
19 08 05	471,47	510,49
19 08 14	29,86	29,86
19 09 02	5,84	5,84
20 03 04	667,09	202,67
20 03 06	1,13	0
TOTAL	1846,65	831,3

Realizando una comparativa entre ambos años, se observa que en el año 2021 el código LER que más se trató es el 19 08 05 (lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas) mientras que, durante el año 2022, destaca el código 20 03 04 (lodos de fosas sépticas).

Teniendo en cuenta el cómputo total de ambos años, el código LER que más predomina es el 19 08 05, seguido del 20 03 04, tal y como aparece representado en la figura 6:



- 020201 - Lodos de lavado y limpieza
- 020204 - Lodos del tratamiento in situ de efluentes
- 020299 - Residuos no especificados en otra categoría
- 020501 - Materiales inadecuados para el consumo o elaboración
- 020502 - Lodos del tratamiento in situ del efluente
- 161002 - Residuos líquidos acuosos distintos a los especificados en el código 161001\* (Residuos líquidos acuosos que contienen sustancias peligrosas)
- 190599 - Residuos no especificados en otras categorías
- 190805 - Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas
- 190814 - Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales distintos a los especificados en el código 190813\* (Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, que contienen sustancias peligrosas)
- 190902 - Lodos de la clarificación del agua
- 200304 - Lodos de fosas sépticas
- 200306 - Residuos de la limpieza de alcantarillas

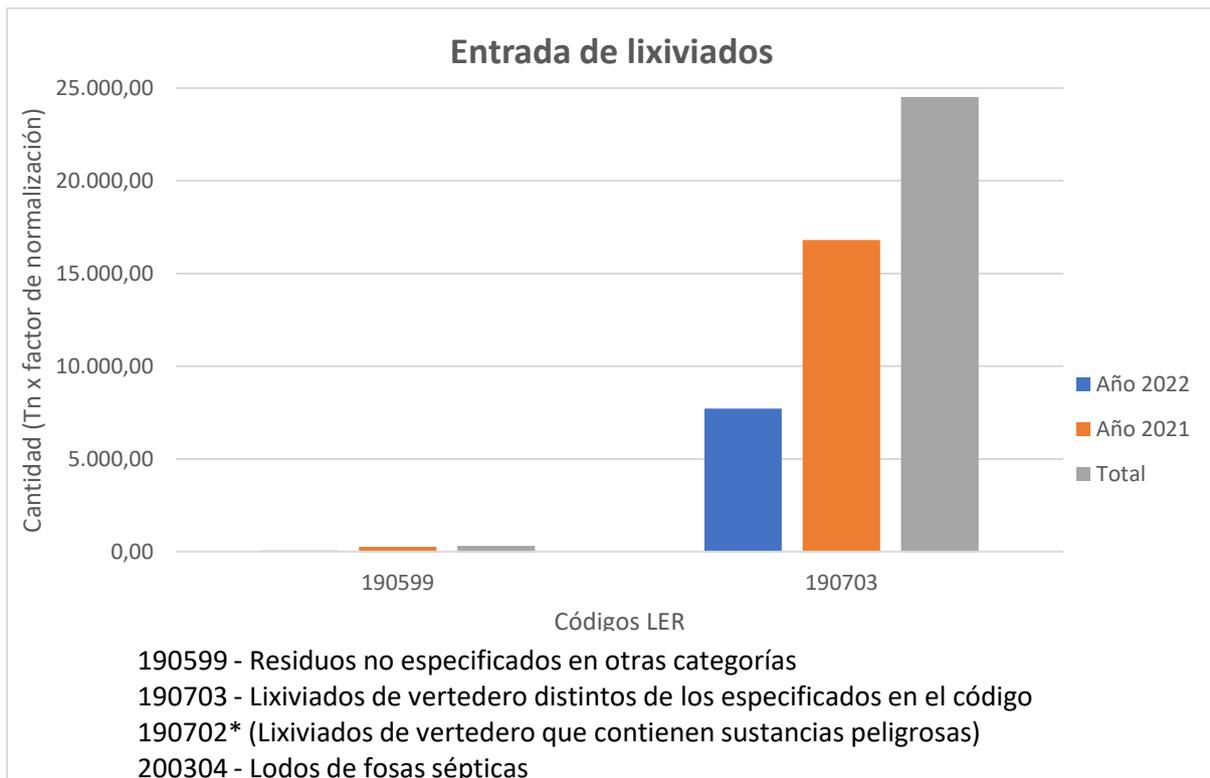
**Figura 6 - Comparativa de cantidades de lodos por código LER**

Por otro lado, se realiza el mismo análisis para el caso de los lixiviados, concluyendo que prácticamente la totalidad de los lixiviados que se tratan en la planta de Oxital se corresponden con el código LER 19 07 03 (lixiviados de vertedero distintos de los especificados en el código 19 07 02; 19 07 02\* – Lixiviados de vertedero que contienen sustancias peligrosas).

Durante el año 2021 y 2022 también se recibió el código 19 05 99 (residuos no especificados en otras categorías). Sin embargo, las cantidades de estos residuos son insignificantes en comparación con el primer código mencionado (Tabla 7 y Figura 7).

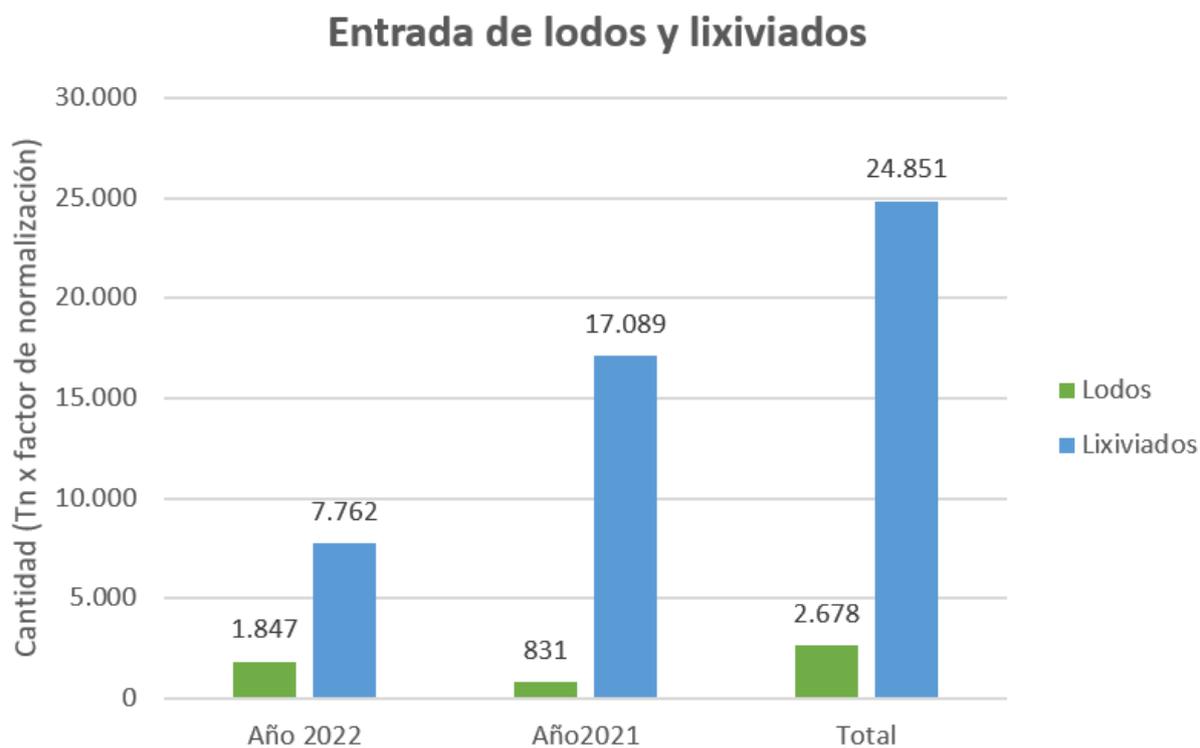
**Tabla 7** - Cantidad de lixiviados por código LER

Cantidad (Tn x factor normalización)		
Código LER	Año 2022	Año 2021
19 05 99	49,22	310,10
19 07 03	7.712,32	24.523,96
TOTAL	7.761,54	24.850,84



**Figura 7** - Comparativa de cantidades de lixiviados por código LER

Por último, comparando las cantidades recibidas tanto de lodos como de lixiviados, se puede apreciar una notable diferencia, donde los lodos representan cerca del 10 % de la cantidad total de residuos tratados en ambos años (Figura 8).

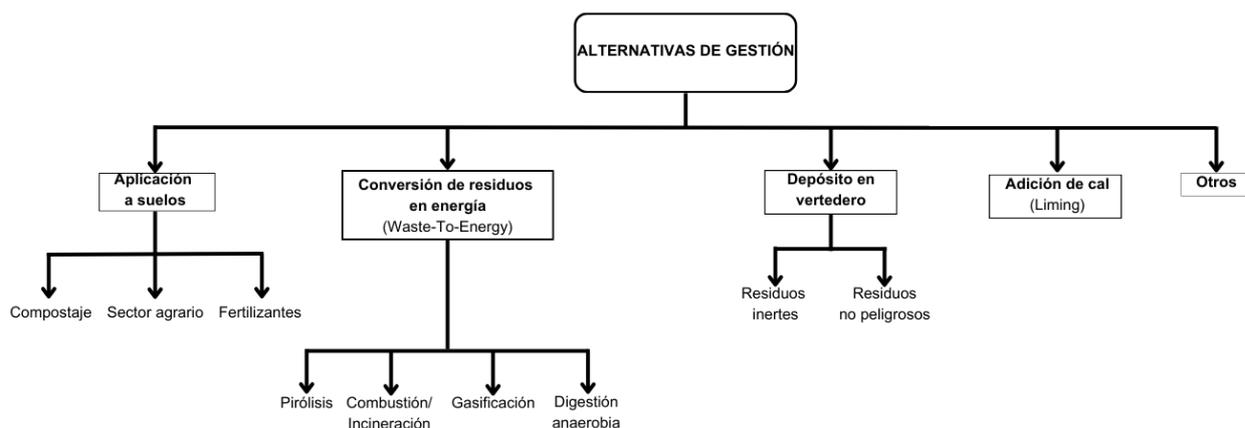


**Figura 8** - Cantidad total de lodos y lixiviados

### 3. POSIBLES ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LODOS DE DEPURADORA

Debido a los problemas generados por la eliminación de lodos de depuradora mediante el depósito en vertedero, es necesario estudiar otras posibilidades para estos residuos. Muchas de las alternativas todavía se encuentran en fase de investigación para verificar su efectividad y rentabilidad, aunque se presentan como posibilidades viables para conseguir la introducción de estos biorresiduos en la economía circular, convirtiéndolos en nuevas materias primas y reduciendo su impacto medioambiental.

Las alternativas que se van a analizar en este proyecto se muestran en la figura 9:



**Figura 9** - Esquema de las alternativas de gestión

La viabilidad económica de las alternativas de gestión de lodos depende en gran medida del potencial de recuperación y los ingresos y beneficios aportados de sus (sub)productos. Los aspectos a tener en cuenta para la selección e implementación efectiva de dichas alternativas son de tipo técnico-económico, ambientales y sociales. Diversos estudios abordan análisis tecnoeconómicos, de generación de gases de efecto invernadero, análisis de ciclo de vida y de emisiones de gases de efecto invernadero para la comparación de diversos sistemas de gestión de lodos EDAR (Houillon & Jolliet, 2005; Zhao et al. 2023). En estos análisis es importante valorar la ubicación de la EDAR/EDARI, el transporte necesario de los lodos hasta las plantas de tratamiento y la potencial distribución y utilización de los productos obtenidos.

### 3.1. APLICACIÓN A SUELOS

Los fertilizantes con un alto contenido de materia orgánica son una fuente esencial en la nutrición vegetal y material energético para los microorganismos, además de ser fundamentales para la reproducción del humus (capa superior de los suelos con actividad orgánica) en suelos cultivables. El principal objetivo de la utilización de tratamiento con lodos es producir una serie de biocompuestos que sean seguros para su uso en agricultura; es decir, que produzcan la reducción o eliminación de patógenos y reduzcan la fermentación de los biosólidos finales (Sugurbekova et al., 2023). Algunos estudios experimentales demuestran que, con una sola aplicación de residuos biodegradables, se consigue mejorar la estructura y la fertilidad del suelo.

Además, tras probar este método de eliminación de lodos de manera experimental, en algunos países de Europa, como Alemania o Suiza, y en Estados Unidos, se ha demostrado que existe una tecnología de tratamiento de lodos eficaz, empleando hasta el 60 % de estos lodos como fertilizante en agricultura, en paisajismo urbano, así como para la recuperación de terrenos o la reforestación, entre otros (Sugurbekova et al., 2023). En Europa, hay que tener en cuenta que este tipo de aplicación se lleva a cabo teniendo siempre el objetivo fundamental de proteger el medio ambiente (WECOOP, 2021).

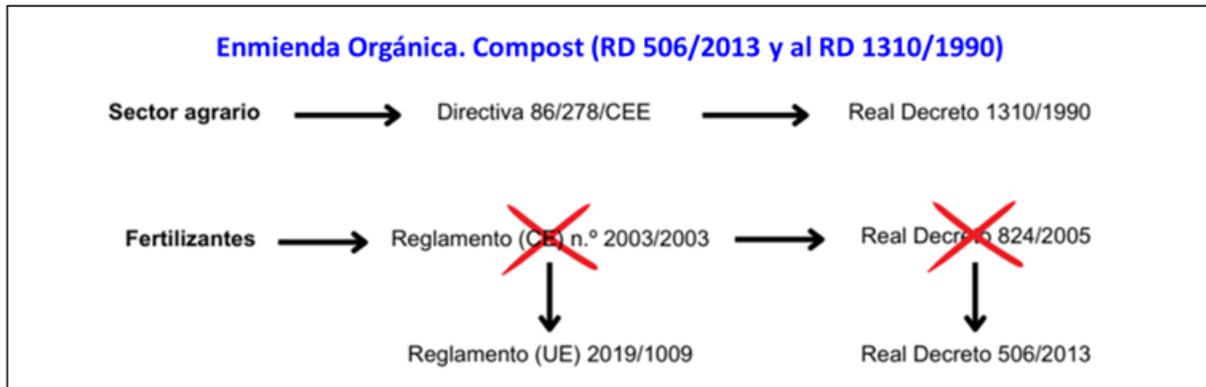
Uno de los compuestos más populares y utilizados con este fin son las enmiendas orgánicas, las cuales pueden variar en función de su origen y composición: estiércol animal, compost y lodos de depuradora, entre otros (Urta et al., 2019). Su principal beneficio es que aportan nutrientes al suelo aumentando su materia orgánica. Sin embargo, las enmiendas orgánicas también contienen contaminantes, entre los que se encuentran patógenos humanos, metales pesados, contaminantes orgánicos y contaminantes ambientales emergentes.

Respecto a los contaminantes ambientales emergentes, destaca la generación de genes de resistencia a los antibióticos (ARG) y bacterias resistentes a los antibióticos (BRA) (Stasinakis et al., 2013). En el caso de que se produzca una acumulación de cobre y zinc, existe una correlación directa entre la concentración de estos metales y el nivel de resistencia a los antibióticos (Urta et al., 2019).

Por otro lado, una aplicación inadecuada de las enmiendas orgánicas puede generar riesgos ambientales no deseados, entre los que destacan un exceso de nutrientes, conocido como eutrofización, la emisión de gases de efecto invernadero o la salinización del suelo.

A pesar de los beneficios que tiene el uso de lodos para su aplicación a suelos, existen limitaciones para su uso relacionadas con los componentes orgánicos e inorgánicos, los cuales son potenciales contaminantes pudiendo dañar el ecosistema y ser un riesgo para la salud de los seres humanos (Hušek et al., 2022; Urta et al., 2019).

A modo de resumen, la figura 10 muestra un esquema de la legislación aplicable a la gestión de lodos de depuradora mediante aplicación en el sector agrario y como fertilizante, que se analizarán en los próximos apartados.



**Figura 10** - Legislación aplicable a la gestión de lodos de depuradora mediante aplicación en el sector agrario y como fertilizante

### 3.1.1. COMPOSTAJE

El compostaje es un tratamiento de biorresiduos que ha ganado popularidad en las últimas décadas. Mediante este proceso se consigue una reducción drástica de su volumen y sin emisión de sustancias peligrosas y contaminantes. Por este motivo, es un tratamiento muy aceptado desde el punto de vista ambiental (Sugurbekova et al., 2023). Además, se trata de un método de gran simplicidad tecnológica, bajo costo y de bajo consumo energético.

El compostaje se produce a partir de productos orgánicos materiales, incluidos los agrarios (residuos de cultivos o estiércol animal) y los desechos sólidos municipales y los lodos de aguas residuales (Urrea et al., 2019).

Durante el proceso del compostaje, los lodos tratados sufren transformaciones tanto físicas como químicas, resultando un producto inerte, neutralizado y estable, que se emplea para mejorar la estructura y la fertilidad del suelo. También se consigue la higienización de los residuos orgánicos, mitigando el riesgo de incorporación de patógenos humanos al ecosistema del suelo, y mejorando los indicadores sanitarios. (Sugurbekova et al., 2023). Uno de los métodos más empleados para desinfectar el compost es mediante la adición de cal y calcita.

El compost muestra en general una menor fracción de materia orgánica lábil que los lodos de partida y, en consecuencia, menor actividad microbiana. Este carácter más estable de la materia orgánica en el compost determina que su degradación, al ser

añadida al suelo, será más lenta que la de un lodo fresco añadido directamente. Por lo tanto, permanecerá más tiempo en el suelo ejerciendo así una mayor durabilidad y efecto positivo en las características físicas del suelo y actuando como fertilizante de efecto gradual (Hernández et al., 2006).

Por otro lado, presenta desventajas debido a la presencia de metales pesados, lo cual limita su aplicación por el posible impacto negativo en la salud de los humanos y en la contaminación ambiental (Smith, 2009). También previene la fermentación incontrolada de los componentes orgánicos, aunque esto puede interferir en el crecimiento de las plantas y ser una fuente de emisiones de metano (Sugurbekova et al., 2023).

### 3.1.2. SECTOR AGRARIO

La utilización de los lodos para cualquier actividad relacionada con el sector agrario viene condicionada, a nivel europeo, por la *Directiva de Consejo 86/278/CEE, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura* y, a nivel estatal, por el *Real Decreto 1310/1990: Utilización de los lodos de depuración en el sector agrario*.

#### 3.1.2.1. DIRECTIVA 86/278/CEE

El objeto de la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, es regular la utilización de los lodos de depuradora en la agricultura para evitar efectos nocivos en los suelos, la vegetación, los animales y el ser humano, fomentando al mismo tiempo su correcta utilización (Directiva 86-278, 1986).

Para entender este documento se definen los siguientes conceptos:

- Lodos:
  - i. Los lodos residuales salidos de estaciones de depuración que traten aguas residuales domésticas o urbanas y de otras estaciones de depuración que traten aguas residuales de

- composición similar a la de las aguas residuales domésticas y urbanas.
- ii. Los lodos residuales de fosas sépticas y de otras instalaciones similares para el tratamiento de aguas residuales.
  - iii. Los lodos residuales salidos de estaciones de depuración distintas de las contempladas en los apartados anteriores.
- Lodos tratados: los lodos tratados por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan, de manera significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización.
  - Agricultura: todo tipo de cultivo de finalidad comercial y alimentaria, incluida en ella la ganadería.
  - Utilización: el esparcimiento de los lodos en el suelo o cualquier otra utilización de los lodos en y dentro del suelo.

El documento consta de dos anexos, en los cuales se especifican todos los límites y procedimientos que se deben tener en cuenta. En el anexo A, se hacen tres distinciones. Por un lado, se establecen los valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (Tabla 8).

**Tabla 8** - Valores de concentración de metales pesados en suelos según la Directiva 86/278 (Anexo A)

Valores de concentración de metales pesados en suelos (mg/kg de materia seca de una muestra representativa de los suelos cuyo pH sea de 6 a 7)	
Parámetros	Valores límite (1)
Cadmio	1 – 3
Cobre (2)	50 – 140
Níquel (2)	30 – 75
Plomo	50 – 300
Zinc (2)	150 – 300
Mercurio	1 – 1,5
Cromo (3)	-

- (1) Los Estados miembros podrán autorizar que se sobrepasen los valores límite arriba citado en el caso de la utilización de los lodos en tierra que, en el momento de la notificación de la presente Directiva, estén dedicadas a la eliminación de los lodos, pero en las que se efectúen cultivos con fines comerciales destinados exclusivamente al consumo animal. Los estados miembros comunicarán a la Comisión el número y la naturaleza de los lugares afectados. Velarán, además, porque de ello no resulte ningún peligro para el ser humano ni para el medio ambiente.
- (2) Los Estados miembros podrán autorizar que se sobrepasen los valores límite para dichos parámetros en suelos cuyo pH sea constantemente superior a 7. En ningún caso las concentraciones máximas autorizadas para dichos metales pesados deberán sobrepasar en más de un 50 % los valores arriba citados. Los Estados miembros velarán, además, porque de ello no resulte peligro alguno para el hombre ni el medio ambiente ni, especialmente, para las capas de agua subterránea.
- (3) No es posible en esta fase fijar los valores límites para el cromo. El Consejo fijará estos valores límite en una fase posterior sobre la base de propuestas que presentará la Comisión en un plazo de un año tras la notificación de la presente Directiva.

Respecto a la concentración de metales pesados en los lodos, los parámetros correspondientes se determinan en el anexo II B (Tabla 9).

**Tabla 9** – Valores de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura según la Directiva 86/278 (Anexo II B)

Valores de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura (mg/kg de materia seca)		
Parámetros	Valores límite (1)	Otros requisitos
Cadmio	20 – 40	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica</li> <li>- Nitrógeno</li> <li>- Fósforo</li> </ul>
Cobre	1.000 – 1.750	
Níquel	300 - 400	
Plomo	750 – 1.200	
Zinc	2.500 – 4.000	
Mercurio	16 - 25	
Cromo (2)	-	

- (1) Los Estados miembros podrán autorizar que se sobrepasen los valores límite arriba citado en el caso de la utilización de los lodos en tierra que, en el momento de la notificación de la presente Directiva, estén dedicadas a la eliminación de los lodos, pero en las que se efectúen cultivos con fines comerciales destinados exclusivamente al consumo animal. Los estados miembros comunicarán a la Comisión el número y la naturaleza de los lugares afectados. Velarán, además, porque de ello no resulte ningún peligro para el ser humano ni para el medio ambiente.
- (2) No es posible en esta fase fijar los valores límites para el cromo. El Consejo fijará estos valores límite en una fase posterior sobre la base de propuestas que presentará la Comisión en un plazo de un año tras la notificación de la presente Directiva.

En la última parte del anexo I C, se determinan los valores límite de cantidades de metales que se introducen en el suelo por unidad de superficie y por unidad de tiempo (Tabla 10).

**Tabla 10** - Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años según la Directiva 86/278 (Anexo I C)

Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años (kg/Ha/año)	
Parámetros	Valores límite
Cadmio	0.15
Cobre	12
Níquel	3
Plomo	15
Zinc	30
Mercurio	0.1
Cromo	-

En el anexo II, se explica el análisis de los lodos y de los suelos y su correspondiente método de muestreo y de análisis. En el análisis de los lodos (anexo II A) se establece

que los parámetros mínimos a analizar son los siguientes: materia seca, materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo, cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo.

Respecto al análisis de los suelos (anexo II B), no son necesarios tantos parámetros, únicamente: pH, cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo.

Por último, en el anexo II C, se mencionan los métodos de muestreo y de análisis:

### **1. Muestreo de los suelos**

Las muestras representativas de suelos sometidos a análisis se constituirán normalmente mediante 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 de la capa arable es inferior a ese valor, pero sin que en ese caso la profundidad de la toma de muestras sea inferior a 10 cm.

### **2. Muestreo de lodos**

Los lodos serán objeto de un muestreo tras su tratamiento, pero antes de la entrega al utilizador y deberán ser representativos de los lodos producidos.

### **3. Método de análisis**

El análisis de los metales pesados se efectuará tras una descomposición mediante un ácido fuerte. El método de referencia de análisis será la espectrometría de absorción atómica. El límite de detección para cada metal no deberá superar el 10 % del valor límite correspondiente.

#### **3.1.2.2. REAL DECRETO 1310/1990**

El Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, surgió de la necesidad de establecer un marco normativo que permita compaginar la producción de lodos de depuración y su utilización agraria en España. Este decreto se acoge a la Directiva de Consejo 86/278/CEE, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura (Real Decreto 1310/1990).

En este documento aparecen las siguientes definiciones relativas al tema tratado:

- Lodos de depuración: 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.
- Lodos tratados: son los lodos de depuración tratados por una vía biológica, química o térmica, mediante el almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzca de forma significativa su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización.
- Actividad agraria: la encaminada a la producción de especies vegetales con finalidad alimentaria, para el consumo humano o ganadero, o con otras finalidades no alimentarias.
- Utilización: cualquier sistema de aplicación de los lodos al suelo, tanto en superficie como en su interior realizada con fines agrarios.

Se establecen los límites de concentración de metales pesados haciendo dos distinciones, al igual que en la Directiva 86/278. Por un lado, el anexo I A determina la máxima concentración de metales pesados que deben tener los suelos sobre los que se van a aplicar los lodos (Tabla 11).

**Tabla 11** - Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el Real Decreto 1310/1990

<b>Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos</b> (mg/kg de materia seca de una muestra representativa de los suelos)		
Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1.5
Cromo	100	150

Se establece que una muestra representativa se constituye mediante la mezcla de 25 muestras tomadas en una superficie inferior o igual a 5 hectáreas de forma homogénea.

Por otro lado, de la misma manera que en el caso anterior, el anexo I B establece el contenido máximo de metales pesados que pueden tener los lodos tratados (Tabla 12).

**Tabla 12** - Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria según el Real Decreto 1310/1990

Valores 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

Por último, en el anexo I C se fijan las cantidades máximas de lodos que se podrán aportar al suelo por hectárea y año teniendo en cuenta el contenido de metales pesados de los suelos y los lodos a aplicar (Tabla 13).

**Tabla 13** - Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años

Valores límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años (kg/Ha/año)	
Parámetros	Valores límite
Cadmio	0.15
Cobre	12
Níquel	3
Plomo	15
Zinc	30
Mercurio	0.1
Cromo	3

Para utilizar los lodos tratados en alguna actividad agraria, deben ir acompañados de toda la documentación requerida, la cual se especifica en el anexo II. El anexo II A se refiere al análisis de los lodos y establece que los parámetros mínimos que deben ser analizados son: materia seca, materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo, cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo. Respecto al análisis de los suelos, anexo II B, solo es necesario analizar los siguientes parámetros: pH, cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo.

En el anexo II C se determinan los métodos de muestro y de análisis que se deben seguir para obtener todos los parámetros necesarios mencionados anteriormente para conseguir la caracterización tanto de los suelos como de los lodos:

### 1. Muestreo de los suelos

Las muestras representativas de suelos sometidos a análisis se constituirán normalmente mediante 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 de la capa arable es inferior a ese valor, pero sin que en ese caso la profundidad de la toma de muestras sea inferior a 10 cm.

## 2. Muestreo de lodos

Los lodos serán objeto de un muestreo tras su tratamiento, pero antes de la entrega al utilizador y deberán ser representativos de los lodos producidos.

## 3. Método de análisis

El análisis de los metales pesados se efectuará tras una descomposición mediante un ácido fuerte. El método de referencia de análisis será la espectrometría de absorción atómica. El límite de detección para cada metal no deberá superar el 10 % del valor límite correspondiente.

De manera complementaria a este Real Decreto, se crea la *Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre la utilización de lodos de depuración en el sector agrario*. Su objetivo es actualizar el contenido del Registro Nacional de Lodos y la información que deben proporcionar las instalaciones depuradoras de aguas residuales, las instalaciones de tratamiento de los lodos de depuración y los gestores que realizan la aplicación en las explotaciones agrícolas de los lodos de depuración tratados (Orden AAA/1072/2013). La información requerida por dicha orden se recoge de manera resumida en la tabla 14:

**Tabla 14 - Resumen de Orden AAA/1072/2013**

Código LER de los lodos			
□ 02 02 04	□ 02 03 05	□ 02 04 03	□ 02 05 02
□ 02 06 03	□ 02 07 05	□ 19 08 05	□ 20 03 04
Tratamientos de la línea de agua de la EDAR			
□ Tratamiento primario			
Aireación prolongada			

□

□ Otros tipos de fangos activos					
□ Procesos de biopelícula					
Extensivos					
□ Eliminación de nutrientes					
Tratamiento de los lodos					
Tratamientos	Indicar productor u otros residuos (LER) utilizados en el tratamiento (de haberlos)	Señalar si el tratamietno ha sido realizado por la EDAR productora de los lodos o bien por otra EDAR/otra instalación de tratamiento			
		EDAR	Otra EDAR/instalación	Nombre de la otra EDAR/instalación	NIMA
Disgetión anaerobia					
Tratamiento químico					
Compostaje					
Otros tratamientos					
Características de los lodos y del suelo					
Muestreo y análisis		Suelo		Lodos	
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.		
<b>Parámetros agronómicos</b>	<b>Unidades</b>		
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 $P_2O_5$ /kg m.s.		
Potasio total	mg $K_2O$ /kg m.s.		
Calcio total	mg $CaO$ /kg m.s.		
Magnesio total	mg $MgO$ /kg m.s.		
Hierro	mg $Fe$ /kg m.s.		
<b>Parámetros microbiológicos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor en el suelo</b>	<b>Valor en los lodos</b>
Salmonella	Presencia o ausencia/25g		
Escherichia coli	u.f.c./g		

Como resumen, la figura 11 muestra las principales características del Real Decreto 1310/1990 en cuanto a la caracterización del lodo de depuradora.

## Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013 y al RD 1310/1990)

### Real Decreto 1310/1990: Utilización de los lodos de depuración en el sector agrario

#### Caracterización del lodo

- Límites en mg/kg de materia seca de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr para uso en suelo
- Características relacionadas con el producto final
  - pH
  - Materia seca (%)
  - Materia orgánica total (%)
  - C/N
  - Nitrógeno total (% sobre materia seca)
  - Nitrógeno amoniacal (% sobre materia seca)
  - Fósforo total (mg/kg de materia seca)
  - Potasio total (mg/kg de materia seca)
  - Calcio total (mg/kg de materia seca)
  - Magnesio total (mg/kg de materia seca)
  - Hierro (mg/kg de materia seca)
  - Parámetros biológicos:
    - Salmonella
    - Escherichia coli

Orden AAA/1072/2013

**Figura 11** - Principales características del Real Decreto 1310/1990 en cuanto a la caracterización del lodo de depuradora

### 3.1.3. FERTILIZANTES

Al igual que en la aplicación de lodos al suelo, la utilización de los lodos como fertilizantes está regulada por el *Reglamento (UE) 2019/1009 del parlamento europeo y del consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE*, derogando el *Reglamento (CE) n.º 2003/2003, de 13 de octubre de 2003, relativo a los abonos*, y en España, por el *Real Decreto 506/2005, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*, el cual derogó el *Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes*.

#### 3.1.3.1. REGLAMENTO (UE) 2019/1009

Mediante el Reglamento 2019/1009 se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE. En él se define producto fertilizante como una sustancia, mezcla, microorganismo o cualquier otro material aplicado o que se destina a ser aplicado en los vegetales o en su rizosfera, en ,os hongos o en su micosfera, o destinado a constituir la rizosfera o la micosfera, por sí

mismo o mezclado con otros materiales, con el fin de proporcionar nutrientes a los vegetales o a los hongos o mejorar su eficiencia natural (Reglamento 2019/1009).

Realiza una clasificación en el Anexo I de las posibles categorías funcionales de producto (CFP) a las que podría pertenecer el residuo de lodo. A su vez, para pertenecer a una de dichas categorías, en el Anexo II, se especifican las categorías de materiales componentes (CMC). Por lo que un producto fertilizante estará constituido únicamente por materiales componentes que cumplan los requisitos para una o varias de las CMC.

En primer lugar, las categorías funcionales de producto establecen una serie de limitaciones:

- No se añadirán intencionadamente fosfatos a ningún producto fertilizante UE. La presencia no intencionada de fosfonatos no podrá ser superior al 0.5% en masa.
- Los requisitos se expresan en forma oxidada para determinados nutrientes. Cuando se evalúe la conformidad basándose en la presencia del nutriente correspondiente en su forma elemental, se utilizarán los siguientes factores de conversión:
  - Fósforo (P): pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) x 0,436
  - Potasio (K): óxido de potasio ( $K_2O$ ) x 0,830
  - Calcio (Ca): óxido de calcio (CaO) x 0,715
  - Magnesio (Mg): óxido de magnesio (MgO) x 0,603
  - Sodio (Na): óxido de sodio ( $Na_2O$ ) x 0,742
  - Azufre (S): trióxido de azufre ( $SO_3$ ) x 0,400
- Los requisitos se expresan por referencia al carbono orgánico ( $C_{org}$ ). Cuando se evalúe la conformidad basándose en la materia orgánica se aplicará el siguiente factor de conversión:
  - Carbono orgánico ( $C_{org}$ ): materia orgánica x 0,56

Existen las siguientes categorías funcionales:

1. Abono o fertilizante
2. Enmienda caliza
3. Enmienda del suelo
4. Sustrato de cultivo

5. Inhibidor
6. Bioestimulante de plantas
7. Mezcla de productos fertilizantes

Analizando las diferentes posibilidades, los residuos de lodo de una EDAR podrían pertenecer a dos de las categorías:

- **CFP 1 (A)(I): Abono orgánico sólido**, cuya función consiste en aportar nutrientes a los vegetales u hongos.

Esta categoría establece las condiciones que aparecen en la tabla:

**Tabla 15** - Reglamento 2019/1009 - CFP 1: Abono o fertilizante; CFP 1 (A)(I): Abono orgánico sólido

Valor límite de concentración de metales pesados y biuret en los lodos destinados a su utilización como abono orgánico sólido (mg/kg de materia seca)		Concentraciones mínimas de nutrientes (porcentaje en masa)		
Parámetros	Valores límite	Parámetro	Un único nutriente primario declarado	Más de un nutriente primario declarado (1)
Cadmio	1,5	Nitrógeno	2,5	1
Cromo hexavalente	2	Pentóxido de fósforo	2	1
Mercurio	1	Óxido de potasio	2	1
Níquel	50	Carbono orgánico	15	
Plomo	120	<b>Concentraciones límite de patógenos (2)</b>		

Arsénico inorgánico	40	Microorganismos	Planes de muestreo			Límite
Cobre	300		n	c	m	M
Zinc	800	Salmonela spp	5	0	0	Ausencia de 25 g o 25 ml
Biuret ( $C_2H_5N_3O_2$ )	0	Escherichia coli o enterococos	5	5	0	1000 en 1 g o 1 ml

(1) La suma de las concentraciones de dichos nutrientes será de al menos un 4%.

(2) Donde:

n = número de muestras del ensayo.

c = número de muestras en las que el número de bacterias expresado en unidades formadoras de colonias (ufc) se sitúe entre m y M.

m = valor umbral del número de bacterias expresado en ufc considerado como satisfactorio.

M = valor máximo del número de bacterias expresado en ufc.

- **CFP 3 (A): Enmienda orgánica**

Se define enmienda del suelo como un producto fertilizante cuya función consista en mantener, mejorar o proteger las propiedades físicas o químicas, la estructura o la actividad biológica del suelo al que se añade. Para pertenecer a esta categoría, el residuo debe cumplir las siguientes condiciones (Tabla 16):

**Tabla 16** - Reglamento 2019/1009 - CFP 3: Enmienda del suelo - CFP 3 (A):  
Enmienda orgánica

Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización como enmienda orgánica (mg/kg de materia seca)		Concentraciones límite de patógenos (2)				
Parámetros	Valores límite	Microorganismos	Planes de muestreo			Límite
Cadmio	2		n	c	M	M
Cromo hexavalente (VI)	2	Salmonela spp	5	0	0	Ausencia de 25 g o 25 ml
Mercurio	1	Escherichia coli o enterococos	5	5	0	1000 en 1 g o 1 ml
Níquel	50	<b>Otros requisitos</b>				
Plomo	120	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El 95 % del material será de origen biológico</li> <li>- Contendrá un 20 % o más de materia seca</li> <li>- El carbono orgánico estará presente en al menos un 7.5 % en masa</li> </ul>				
Arsénico inorgánico	40					
Cobre	300					
Zinc	800					

Por otro lado, en el anexo II se realiza una clasificación de 11 posibles categorías de materiales componentes (CMC):

- CMC 1: Sustancias y mezclas vírgenes.
- CMC 2: Plantas, partes de plantas o extractos vegetales.
- CMC 3: Compost.

- CMC 4: Digestato de cultivos frescos.
- CMC 5: Digestato distinto del digestato de cultivos frescos.
- CMC 6: Subproductos de la industria alimentaria.
- CMC 7: Microorganismos.
- CMC 8: Polímeros de nutrientes.
- CMC 9: Polímeros distintos de los polímeros de nutrientes.
- CMC 10: Productos derivados en el sentido del Reglamento (CE) n.º 1069/2009.
- CMC 11: Subproductos con arreglo a la Directiva 2008/98/CE.

Las siguientes categorías de materiales componentes quedan descartadas, ya que el tipo de residuos no se ajusta a lo especificado: CMC 1, CMC 2, CMC 4, CMC 6, CMC 7, CMC 8, CM 9. Los residuos de lodo podrían pertenecer a las categorías CMC 3 o CMC 5. Sin embargo, quedan excluidos en estas categorías los lodos de depuradora, lodos industriales o lodos de dragado. Respecto a la categoría CMC 10, son productos derivados del Reglamento (CE) n.º 1069/2009, en el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano.

Por último, para pertenecer a la categoría CMC 11, subproductos con arreglo a la Directiva 2008/98/CE, habría que descatalogar los residuos de lodos y convertirlos en subproductos, lo que conllevaría un cambio completo del tipo de producto que se está tratando.

### 3.1.3.2. REAL DECRETO 506/2013

El objetivo del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, es establecer la normativa básica en materia de productos fertilizantes y las normas necesarias de coordinación de las comunidades autónomas (Real Decreto 506/2013).

En este documento se realizan las siguientes definiciones:

- Producto fertilizante: producto utilizado en agricultura o jardinería que, por su contenido en nutrientes, facilita el crecimiento de las plantas, aumenta su rendimiento y mejora la calidad de las cosechas o que, por su acción específica, modifica, según convenga, la fertilidad del suelo o sus características físicas, químicas o biológicas. Se incluyen en esta definición los abonos, los productos especiales y las enmiendas.
- Enmienda orgánica: enmienda procedente de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el

contenido en materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades física y mejorar también sus propiedades o actividad química o biológica.

Se establece la siguiente clasificación según el tipo de producto fertilizante:

- Grupo 1: Abonos inorgánicos nacionales
- Grupo 2: Abonos orgánicos
- Grupo 3: Abonos órgano – minerales
- Grupo 4: Otros abonos y productos especiales
- Grupo 5: Enmiendas calizas
- Grupo 6: Enmiendas orgánicas
- Grupo 7: Otras enmiendas

Analizando cada grupo y teniendo en cuenta las características de los lodos de depuradora, éstos se podrían ubicar en el grupo 6 (Enmiendas orgánicas). Aunque en el artículo 3, correspondiente al ámbito de aplicación, se excluyen los lodos de depuradora previstos en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula su utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Se define la enmienda orgánica compost (grupo 6 – Enmiendas orgánicas) como producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), de materiales orgánicos biodegradables del anexo IV. Entre estos materiales, se encuentran los códigos LER que conforman principalmente los lodos tratados en la planta de Oxital:

- 19 08 05: Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas, con contenidos en metales inferiores a los establecidos en el Real Decreto 1310/1990.
- 19 08 12: Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales, que no contienen sustancias peligrosas.
- 19 08 14: Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, que no contienen sustancias peligrosas.

Las características mínimas que se deben conocer del producto son las siguientes (Tabla 17):

**Tabla 17** - Características del producto según el Real Decreto 506/2013

<p><b>Contenido mínimo en nutrientes (porcentaje en masa)</b></p> <p><b>Información sobre la evaluación de los nutrientes</b></p> <p><b>Otros requisitos</b></p>	<p><b>Otras informaciones sobre la denominación del tipo o del etiquetado</b></p>	<p><b>Contenido en nutrientes que debe declararse y garantizarse. Formas y solubilidad de los nutrientes.</b></p> <p><b>Otros criterios</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total: 35%</li> <li>- Humedad: entre 30 y 40%                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- C/N &lt; 20</li> </ul> </li> </ul> <p>No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.</p> <p>El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH</li> <li>- Conductividad eléctrica</li> <li>- Relación C/N</li> <li>- Humedad mínima y máxima</li> <li>- Materias primas utilizadas</li> <li>- Tratamiento o proceso de elaboración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total</li> <li>- C orgánico</li> <li>- N total (si supera el 1%)</li> <li>- N orgánico (si supera el 1%)</li> <li>- N amoniacal (si supera el 1%)</li> <li>- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total (si supera el 1%)</li> <li>- K<sub>2</sub>O total (si supera el 1%)</li> <li>- Ácidos húmicos</li> <li>- Granulometría</li> </ul>

Por otro lado, en el anexo V se recogen todos los criterios aplicables a los productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componente orgánicos. Entre estos criterios, aparecen el límite máximo de microorganismos (Tabla 18) y el límite máximo de metales pesados (Tabla 19).

**Tabla 18** - Valores límite de concentración de microorganismos según el Real Decreto 506/2013

Valores límite de concentración de microorganismos	
Parámetros microbiológicos	Límites
Salmonella	Ausente en 25 g de producto elaborado
Escherichia coli	< 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado

**Tabla 19** - Valores límite de concentración de metales pesados según el Real Decreto 506/2013

Valores límite de concentración de metales pesados (mg/kg de materia seca)			
Parámetros	Valores límite		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial

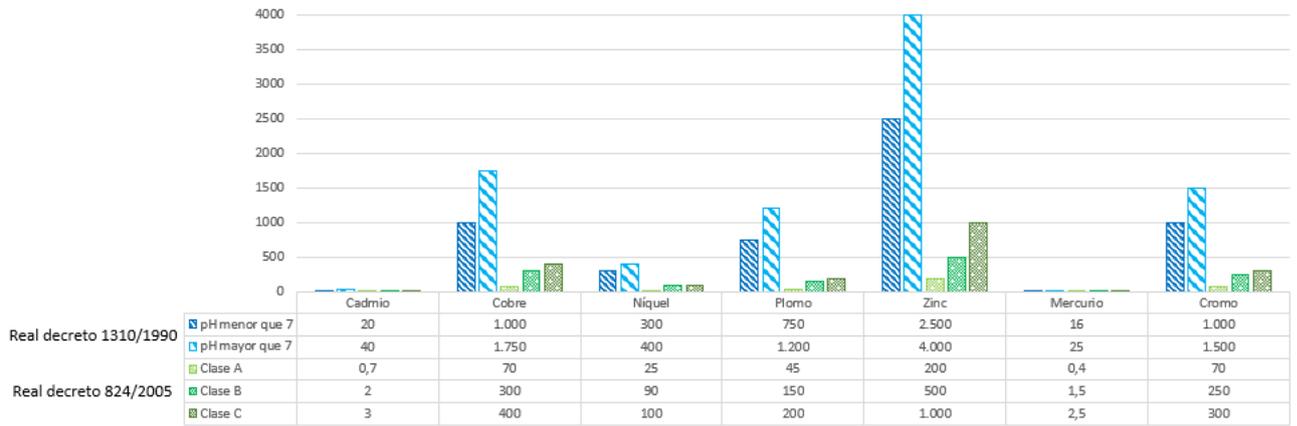
En esta última tabla se hace una distinción de clases:

- Clase A: productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna A.
- Clase B: productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna B.
- Clase C: productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de los valores de la columna C.

Existe una limitación de uso relacionada con esta clasificación de clases: los productos de la clase C no podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por hectárea y año. En zonas de especial protección, las Comunidades Autónomas modificarán, en su caso, la cantidad anterior.

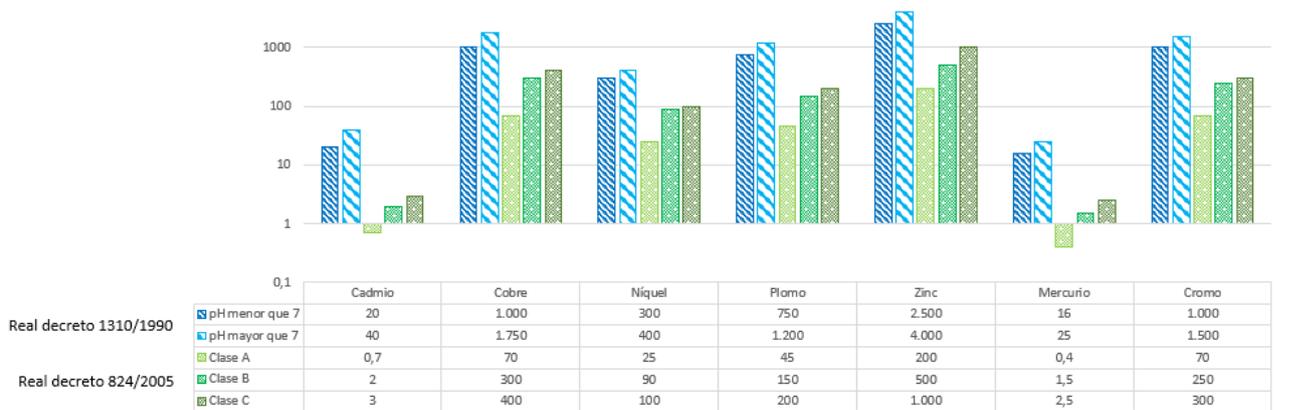
Por último, se realiza una comparación (Figura 10 y 11) entre los límites de concentración de metales pesados que imponen el Real Decreto 1310/1990, de uso de lodos en el sector agrario, y el Real Decreto 506/2013, de fertilizantes.

**Valores límite de concentración de metales pesados de Real Decreto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013**



a.

**Valores límite de concentración de metales pesados de Real Deceto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013- Escala logarítmica**



b.

**Figura 12 - Valores límite de concentración de metales pesados de Real Decreto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013 (a. Escala decimal; b. Escala logarítmica)**

**Tabla 20** - Valores límite de concentración de metales pesados de Real Decreto 1310/1990 y Real Decreto 506/2013

Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013)				Limite lodos destinados a utilización agraria RD 1310/1990
<b>Parámetros</b>				
Materia orgánica total (%). Calcínación a 540 C			>35	
Humedad máxima (%)			40	
C/N			< 20	
Salmonella			Ausente en 25 g de producto elaborado	
Eschericia coli			< 1000 número mas probable (NMP) por gramo de producto elaborado	
<b>mg/kg</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>(mg/kg dw)</b>
Cadmio	0,7	2	3	20-40
Cobre	70	300	400	1000-1750
Níquel	25	90	100	300-400
Plomo	45	150	200	750-1200
Zinc	200	500	1000	2500-4000
Mercurio	0,4	1,5	2,5	16-25
Cromo Total	70	250	300	1000-1500
Cromo (VI)	-	-	-	

A partir del análisis de las figuras 10 y 11 y de la tabla 20, se concluye que los lodos utilizados para su aplicación en agricultura pueden contener una mayor cantidad de metales pesados en comparación con la posible aplicación como fertilizantes.

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se muestran, de manera resumida, las implicaciones del Real Decreto 506/2013 sobre productos fertilizantes aplicado al caso de los lodos de depuradora. La figura 13 muestra las necesidades de caracterización de los lodos para su potencial aplicación como enmienda orgánica-compost.

### Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013 y al RD 1310/1990)

**Real Decreto 506/2013: sobre los productos fertilizantes**

**Caracterización del lodo**

- Límites en mg/kg de materia seca de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr para uso en suelo
- Características relacionadas con el producto final
  - pH
  - Materia seca (%)
  - Materia orgánica total (%)
  - Conductividad eléctrica
  - Humedad mínima y máxima
  - C/N
  - Nitrógeno total (% sobre materia seca)
  - Nitrógeno orgánico (% sobre materia seca)
  - Nitrógeno amoniacal (% sobre materia seca)
  - Fósforo total (mg/kg de materia seca)
  - Potasio total (mg/kg de materia seca)
  - Ácidos húmicos
  - Granulometría
  - Parámetros biológicos:
    - Salmonella
    - Escherichia coli

**RD 506/2013: Artículo 3. Ámbito de aplicación**

3. Se excluyen del ámbito de aplicación de este RD:

f. Los lodos de depuradora previstos en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

↓

**Anexo I – Relación de tipos de productos fertilizantes**

**Grupo 6 – Enmiendas orgánicas**

**Nº02 – Enmienda orgánica Compost**

Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del **Anexo IV**, recogidos separadamente.

↓

**Anexo IV- LISTA DE RESIDUOS ORGANICOS BIODEGRADABLES**

➢ [19 08 05](#) / [19 08 12](#) / [19 08 14](#)

**Figura 13** - Caracterización del lodo para uso como Enmienda orgánica – Compost

La figura 14 resume los principales parámetros a tener en cuenta en la obtención de compost, así como los diagramas de flujo del proceso de compostaje tanto en sistema abierto de pilas como en sistema cerrado de reactor.

### Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013 y al RD 1310/1990)

**Proceso**

- **Input:** Lodos + Material estructurante → Tipos, proporciones, granulometrías (80% < 120 mm con un 50 % entre 50 y 100 mm)
- **Control:** T, Humedad, CO<sub>2</sub>
- **Tiempo:** 3-4 / 6 meses
- **Procedimiento:** Trincheras (1,5m x 1m x L) con aireación forzada y cubiertas con láminas semipermeables.

**Fase de deshidratación:** reducción de humedad del lodo.

**Fase de fermentación:** control de temperatura para higienizar el material y estabilizarlo.

**Fase de maduración:** obtención de la calidad final.

- **Recogida de lixiviados. Captación de gases**
- **Toma de muestras:** Mezcla, Mitad y Final de Fermentación, Maduración, Producto → Análisis de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N.

**Figura 14** - Principales características del proceso de compostaje de lodos de depuradora

La figura 15 muestra las características exigidas al producto final obtenido de compostaje de lodos de depuradora. Se tiene en cuenta tanto los parámetros mínimos a cumplir como informaciones adicionales y clasificación del producto final.

**Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013 y al RD 1310/1990)**

**Producto**

**Mínimos**

- **Materia orgánica total:** 35%
- **Humedad máxima:** 40%
- **C/N** < 20
- **No** podrá contener **impurezas ni inertes** de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos
- El 90% de las partículas pasarán por la **mallá de 25 mm.**
- Parámetros microbiológicos: **Salmonella** (ausente en 25 g de producto elaborado); **Eschericia coli:** < 1000 número mas probable (NMP) por gramo de producto elaborado

**Otras informaciones**

- **pH - Conductividad eléctrica** - Relación C/N - **Humedad mínima y máxima** - **Materias primas** utilizadas
- **Tratamiento o proceso de elaboración**, según la descripción indicada en la columna 3 → [Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente]

**Contenidos y Otras declaraciones**

- Materia orgánica total - **C orgánico** - **N total (si supera el 1%)** - **N orgánico (si supera el 1%)** - **N amoniacal (si supera el 1%)** - **P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total (si supera el 1%)** - **K<sub>2</sub>O total (si supera el 1%)** - **Acidos húmicos** – Granulometría
- Limite a contenido en **Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr** para clasificación como tipo A, B, C.

**Figura 15** - Características del producto final de compostaje

La figura 16 muestra las características del suelo destino del compost obtenido. Es necesario tener en cuenta la viabilidad de venta y aplicación del producto final obtenido, lo cual puede ser muy dependiente de las características del suelo a aplicar. En este sentido, en la Comunidad Autónoma de Cantabria, el Centro de Investigación y Formación Agrarias (CIFA) puede ser un actor importante en la aplicación y destino final del producto final obtenido por compostaje de lodos de depuradora.

## Enmienda Orgánica. Compost (RD 506/2013 y al RD 1310/1990)

### Suelo Destino

→ Caracterización exhaustiva tanto de la enmienda orgánica como de la agroecosistema en sí previo a su aplicación, con el fin de identificar las potencialidades y limitaciones de cualquier enmienda orgánica dada para la salud del suelo y del cultivo.

→ Agrícola, Frutícola, Horticultura, Jardinería, Restauración paisajística, restauración de espacios degradados, aditivo a otros sustratos.

- Caracterización del suelo (mg/kg). Límites: **pH, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr**
- Límites anuales en suelo (kg/Ha/año) de Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr
- Productos de clase C limitado a < 5 t/Ha/año en suelos agrícolas. Limitaciones adicionales CCAA



Centro de Investigación y Formación Agrarias. Dirección General de Desarrollo Rural.  
Consejería de Desarrollo Rural, Ganadería, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

Figura 16 - Características del suelo destino del compost obtenido

### 3.2. CONVERSIÓN DE RESIDUOS EN ENERGÍA

En la actualidad, los recursos energéticos convencionales, entre los que se encuentran el carbón, el gas natural y el petróleo, son recursos no renovables, por lo que llegará un punto en el que se agoten. Por este motivo, el uso de fuentes de energía renovables se está convirtiendo en un recurso indispensable (Chen et al., 2023a).

La biomasa es la materia orgánica generada a partir de plantas vivas o desechos sólidos municipales, incluidos árboles, hierba y residuos agrícolas. La energía generada a partir de la biomasa ayuda a reducir la dependencia del petróleo de fuentes extranjeras. Se trata de un recurso abundante y renovable, por lo que se considera una fuente prometedora de energía alternativa para satisfacer la demanda energética.

Otra ventaja de esta fuente de energía es la posibilidad de generar empleo e ingresos en zonas rurales, siendo un estímulo para el crecimiento económico y ayudando a erradicar la pobreza en los países en desarrollo (Chen et al., 2023a).

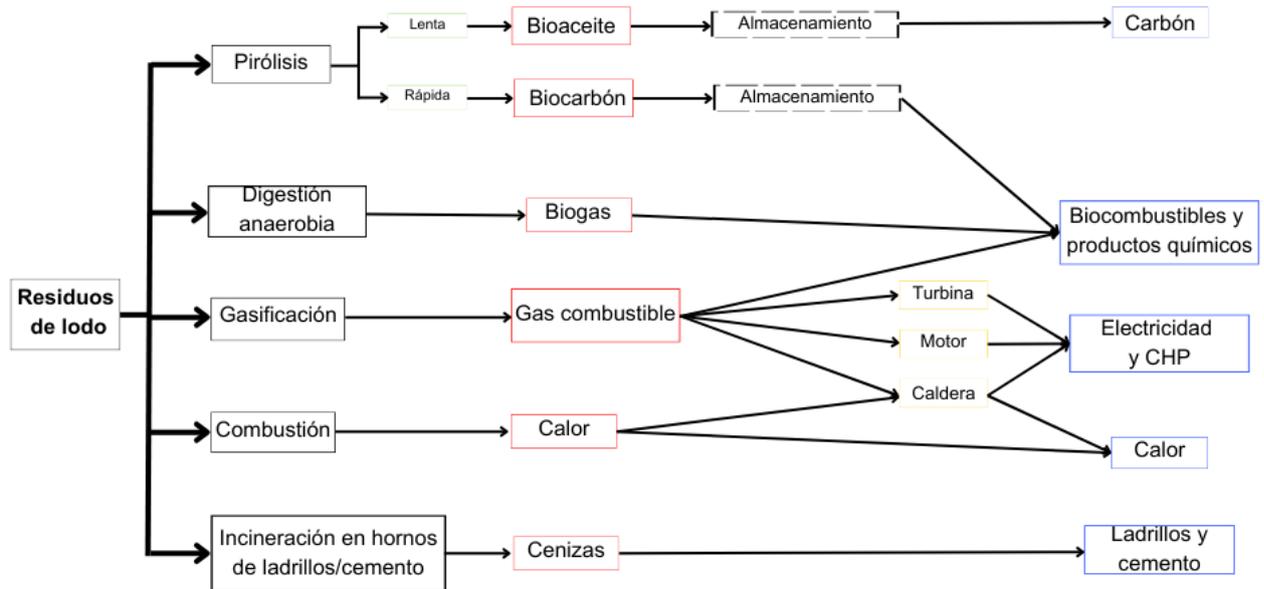
Así, la recuperación energética, o en términos en inglés 'Waste To Energy', consiste en una diversidad de procesos térmicos de tratamiento de los residuos donde se generan productos como biogás, bioaceite o biocarbón, y/o energía directa o a través de los productos mencionados. Esta energía se puede conseguir ya que los sólidos

de las aguas residuales contienen energía química almacenada en los compuestos orgánicos que se concentran en los lodos de depuradora (Ha et al., 2022). A partir de tecnologías fisicoquímicas, bioquímicas y termoquímicas se puede convertir esta biomasa en biocombustibles.

Respecto a los diferentes procesos, éstos pueden ser procesos físicos o químicos para obtener los productos deseados a una temperatura y presión concreta. Mientras que el proceso bioquímico implica el uso de microorganismos y enzimas para degradar la biomasa bajo condiciones de control. A diferencia de esto, el proceso de conversión termoquímica degrada la biomasa con ayuda del calor y en presencia o ausencia de oxígeno para producir productos de alta densidad energética (Chen et al., 2023a).

La **conversión en energía** (Waste-To-Energy) a partir de los lodos de depuradora se puede conseguir mediante diferentes tratamientos y obtener una gran variedad de productos como se esquematiza en la figura 17. La caracterización del lodo destinado a esta vía de gestión contemplará al menos:

- Análisis elemental (C-N-H-O-S-Cl)
- Contenido en cenizas
- Metales, con especial atención a los más volátiles que puedan acompañar a los gases de combustión y a las cenizas volantes (por ejemplo, Hg, Cd, Pb, Zn, As)
- Poder calorífico (MJ/kg)



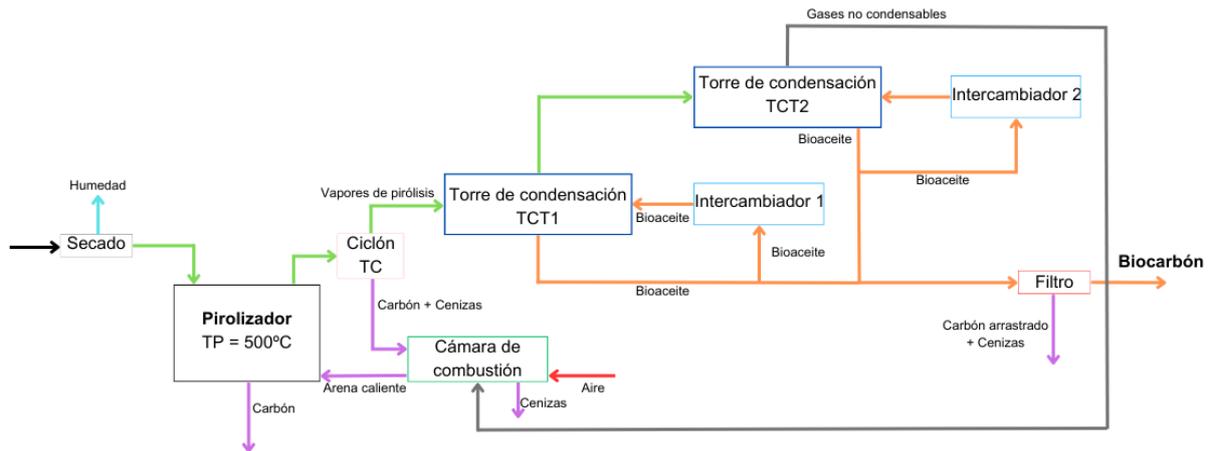
**Figura 17** - Esquema de las posibilidades de conversión en energía

### 3.2.1. PIRÓLISIS

La **pirólisis** es un proceso de conversión termoquímica que convierte la biomasa en productos energéticos mediante un calentamiento en ausencia de oxígeno (Wu et al., 2016) y en el que se produce un cambio químico irreversible de los residuos (Sugurbekova et al., 2023). Los productos obtenidos son diferentes proporciones de fase gas (biogás, fase líquida (biocombustibles) y fase sólida (carbón o biocarbón)). Este proceso puede alcanzar temperaturas de entre 300 y 700 °C.

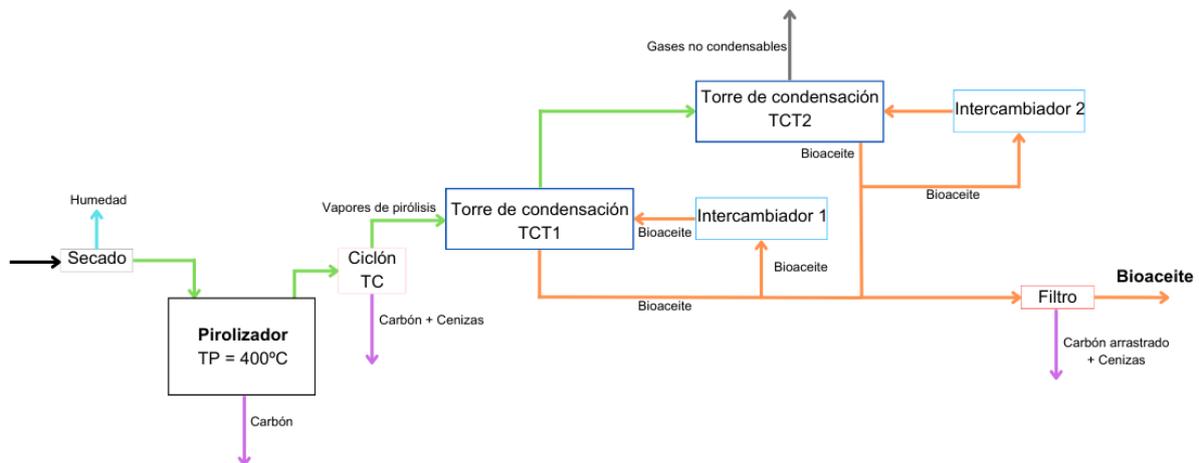
Existen dos posibilidades para su realización en función de la velocidad de calentamiento del reactor (Kan et al., 2016):

- Pirólisis lenta (Figura 18): el proceso tiene una velocidad lenta de calentamiento. Su objetivo es reducir el volumen de residuos, maximizando la producción de biocarbón. Este modelo se basa en el uso de un horno rotatorio porque es el único tipo de reactor que ha logrado una buena implementación industrial (Babler et al., 2017). El biocarbón obtenido se produce para fines ambientales, especialmente para la mejora del suelo (Lehmann et al., 2015).



**Figura 18** - Proceso de pirólisis lenta

- Pirólisis rápida (Figura 14): mediante este proceso se obtiene bioaceite líquido a una mayor velocidad de calentamiento. La configuración de este modelo fue basada en plantas piloto comerciales utilizando un reacto de lecho fluidizado (Jagodzińska et al., 2021).



**Figura 19** - Proceso de pirólisis rápida

Ambos procesos necesitan dispositivos similares: pirolizador, torres de condensación, intercambiadores y filtros. La principal diferencia entre ellos es que en el tratamiento de pirólisis lenta es necesaria la presencia de una cámara de combustión.

Respecto al bioaceite que se consigue a partir del proceso de pirólisis rápida, se trata de un producto que presenta una serie de desventajas en comparación con otros productos; como, por ejemplo, aquellos productos derivados del petróleo. A pesar de esto, es un producto de interés por su aplicaciones en plantas de energía, plantas de calefacción o agricultura (Hušek et al., 2022).

Con el objetivo de mejorar la calidad del bioaceite, se plantean diferentes técnicas. Algunas de ellas son la posibilidad de utilizar un catalizador o añadir una alimentación conjunta, denominado copirólisis.

La **copirólisis** se define como el proceso en el que se mezclan dos materias primas diferentes y se alimenta a un reactor que se encuentra en ausencia de oxígeno. La correcta selección de la materia prima es una parte fundamental de este proceso. La principal materia prima es la biomasa acompañada de una coalimentación, las cuales se mezclan de manera homogénea y se someten al proceso de pirólisis. Dentro de las posibles coalimentaciones se encuentran los desechos plásticos, los desechos neumáticos, los desechos de aceite de cocina, los lodos de depuradora, biomasa lignocelulósica y varios tipos de algas marinas. A la hora de seleccionar entre las diferentes posibilidades, se debe tener en cuenta que es necesaria una alta proporción de hidrógeno respecto al carbono de la materia prima total. A partir de este tratamiento se pueden obtener productos como biopetróleo, biocarbón y gases combustibles (Chen et al., 2023; Mohamed et al. 2023).

Por lo tanto, la copirólisis se presenta como una técnica prometedora que ofrece ventajas, tales la reducción de la dependencia de fuentes de combustibles fósiles, mejorar la gestión de residuos, la mejora de la calidad del producto sin proceso secundarios o la gran disponibilidad de alimento.

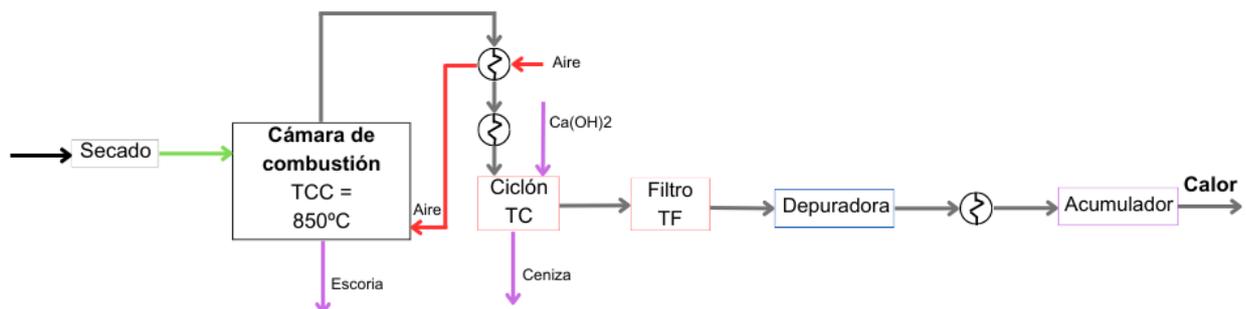
Por último, la pirólisis ha ido ganando importancia por la sencillez del proceso, la alta productividad y la facilidad de operación a pequeña escala (Ha et al., 2022). Otra ventaja es la eficacia que presenta para evitar la contaminación ambiental, evitando la liberación de sustancias químicas nocivas al aire. Sin embargo, a gran escala, requiere grandes áreas, equipamientos costosos e importantes inversiones (Sugurbekova et al., 2023), por lo que su implementación a nivel industrial es limitada.

### 3.2.2. COMBUSTIÓN / INCINERACIÓN

La **combustión** es un proceso termoquímico que ocurre a altas temperaturas en presencia de aire, resultando la transformación del material en  $CO_2$  y  $H_2O$  (Syed-Hassan et al., 2017). Este proceso produce una gran cantidad de calor, el cual puede ser empleado para otras aplicaciones como para la generación de vapor en calderas.

Este tratamiento es capaz de reducir el volumen de los lodos en un 90 % (Yi et al., 2023), motivo por el cual durante muchos años se ha utilizado como método para eliminar los lodos en vez de como una tecnología de conversión. Esto supone una ventaja para aquellas EDAR ubicadas en zonas urbanas que tienen poco espacio disponible para la eliminación de los lodos y limitaciones para su aplicación a suelos. A pesar de ser uno de los métodos más utilizados tradicionalmente, presenta muchos problemas relacionados con la contaminación del aire, los cuales se mitigan con el uso de equipos de control de la emisiones atmosféricas. Por lo tanto, desde el punto de vista energético, medioambiental y económico este proceso es poco atractivo (Ronda et al., 2023a). El balance energético y el cumplimiento de la Directiva 2000/76/CE, sobre incineración de residuos, son dos de los aspectos primordiales a tener en cuenta en esta vía de gestión.

Para llevar a cabo este proceso es necesario disponer de una cámara de combustión, intercambiadores de calor, ciclones, filtros, depuradoras y acumuladores (Figura 20), de manera que se eviten emisiones a la atmósfera de compuestos peligrosos.



**Figura 20** - Proceso de combustión / incineración

Una versión de la incineración es la **monoincineración**. Es una tecnología para el tratamiento de lodos de depuradora que se lleva a cabo en monoincineradores de lecho fluidizado (dispositivo con una cama de arena caliente u otro material granular utilizado para transferir calor directamente a los residuos). Primero se hace un secado de las aguas residuales con agua caliente, aire caliente o energía solar y luego se procede al incinerado a una temperatura de 750 – 950 °C, dependiendo de la cámara de combustión (Hušek et al., 2022).

Así mismo, los lodos de depuradora, previamente deseados, han sido incinerados en hornos de fabricación de ladrillos a 1000 °C y en hornos de cemento a 1400 °C. En

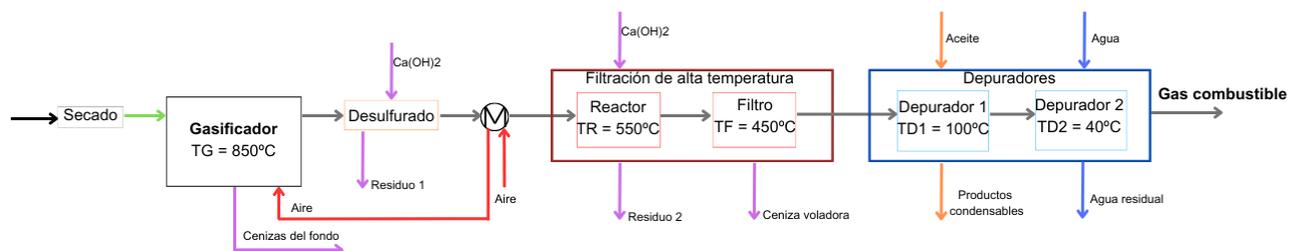
estos casos, los lodos sustituyen ciertas cantidades de materias primas para producir ladrillo o cemento (Benlalla et al., 2005; Sarabia et al., 2019).

### 3.2.3. GASIFICACIÓN

La **gasificación** descompone la materia orgánica sin combustión. Este proceso se produce en un ambiente parcialmente oxidado con un 20 – 40 % del oxígeno total que se requeriría para la combustión (Saldaña Escorcía & Castillo Gámez, 2021).

Este tratamiento tiene dos productos principales: el gas de síntesis y el biocarbón. El gas de síntesis está compuesto, principalmente, por  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$  y  $H_2O$  en proporciones que dependen del agente utilizado en la gasificación y de las variables del propio proceso. El gas tiene diferentes aplicaciones, entre las que se encuentran la generación de electricidad, uso en calefacción, la producción de hidrógeno o en la industria química. Además, para conseguir este gas, existen unas condiciones operativas utilizando un paso de limpieza de gases que maximizan su producción (Ronda et al., 2023b).

El tratamiento de gasificación necesita el reactor de gasificación o un gasificador, un proceso de desulfurado, una filtración de sólidos a alta temperatura y, finalmente, dos depuradores para eliminar compuestos condensables o pesados del gas (Figura 21).



**Figura 21** - Proceso de gasificación

### 3.2.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA

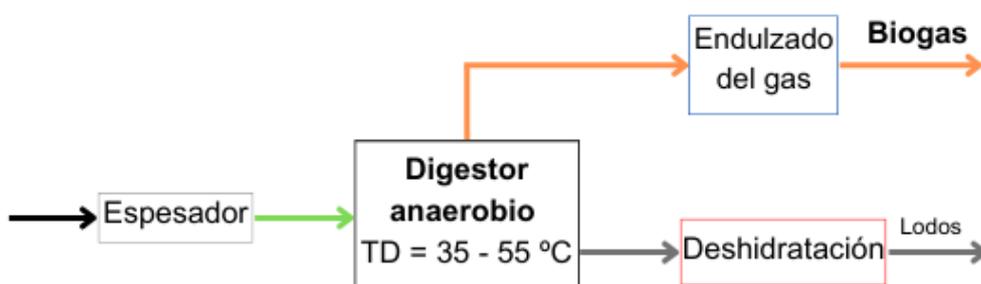
La **digestión anaerobia** es uno de los tratamientos de lodos de depuradora más empleados en la actualidad. Este proceso consiste en una serie de reacciones químicas que provocan la descomposición de los materiales orgánicos en ausencia de oxígeno (Sugurbekova et al., 2023). Es capaz de reducir el volumen de los lodos

hasta un 50 % produciendo biogás y biosólidos tratados con menor cantidad de patógenos que los lodos crudos (Ha et al, 2022).

Este tratamiento se realiza con el objetivo de obtener biogás como producto principal. Este gas está compuesto por un 60 – 70 % de metano ( $CH_4$ ), un 30 – 40 % de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y pequeñas cantidades de  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$  y  $H_2O$  y se emplea para la producción de energía. Tiene diversas aplicaciones, como proporcionar calor, generar electricidad, potenciar la refrigeración en sistema y, si es purificado eliminando los constituyentes indeseables, para generar gas natural renovable (Ha et al, 2022). Además, otra ventaja del biogás es que las emisiones de dióxido de carbono se consideran neutras, ya que la cantidad de  $CO_2$  generado durante el proceso de combustión es similar a la cantidad absorbida de este gas durante el crecimiento de las plantas.

Este tratamiento se ha propuesto como un mecanismo eficaz para evitar las consecuencias negativas que presenta la aplicación de los residuos orgánicos al suelo agrícola. La digestión anaerobia reduce considerablemente los niveles de residuos orgánicos, las sustancias contaminantes y los posibles patógenos humanos presentes en las enmiendas orgánicas (Urrea et al., 2019).

Este tratamiento requiere estos elementos para su realización: digestor anaerobio, espesador, una fase de deshidratación para secado de los lodos y un endulzado del gas, para eliminar los componentes ácidos (Figura 22).



**Figura 22** - Proceso de digestión anaerobia

Otro tratamiento relacionado directamente con la digestión anaerobia es la **codigestión**. Consiste en la digestión simultánea de dos o más sustratos, evitando los inconvenientes de la monodigestión y mejorando la sostenibilidad económica debido a un aumento en la generación de biogás (entre 25 y 400 %) y en el

rendimiento del metano (82%)  $CH_4$  (Paranjpe et al., 2023). Entre los posibles sustratos se encuentran los productos de desecho municipal, industriales, agrícolas y ganaderos.

Además de los parámetros de rendimiento y producción, la codigestión anaerobia mejora la estabilización del proceso, establece un equilibrio entre los nutrientes, reduce la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y presenta ventajas económicas por la posibilidad de compartir equipos y costes.

### 3.3. DEPÓSITO EN VERTEDERO

El **depósito en vertedero** es el sistema de eliminación de lodos más utilizado, especialmente en los países en desarrollo (Sugurbekova et al., 2023). Este método de gestión presenta una serie de desventajas que pueden tener un grave impacto en la salud humana, además de la toxicidad ecológica que producen y la alta contribución al calentamiento global por las emisiones de metano.

En España, esta práctica está regulada por el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. El objetivo de dicha legislación es establecer un marco jurídico para las actividades de eliminación, garantizar una reducción progresiva de los residuos depositados en vertedero y establecer medidas y procedimientos para prevenir, reducir e impedir los efectos negativos en el ambiente relacionado con el vertido de residuos (Real Decreto 646/2020).

En el artículo 5 se hace una clasificación según las clases de vertederos:

- Vertedero para residuos peligrosos.
- Vertedero para residuos no peligrosos.
- Vertedero para residuos inertes.

Debido a las características que presentan los lodos de depuradora que se estudian, se descarta la opción de depósito en vertedero para residuos peligrosos, por lo que no se detallarán los parámetros relativos a dicha clase.

### 3.3.1. RESIDUOS INERTES

Se define **residuo inerte** como aquel residuo no peligroso que no experimenta transformaciones física, químicas o biológicas significativas. Estos residuos no son solubles, ni combustibles, ni biodegradables; ni reaccionan con los materiales con los que entran en contacto ni física, ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a la contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana. Los residuos inertes deben presentar un contenido de contaminantes insignificante y, del mismo modo, el potencial de lixiviación de estos contaminantes, así como el carácter ecotóxico de los lixiviados debe ser igualmente insignificante. Los residuos inertes y sus lixiviados no deben suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas.

En cuanto a la admisión en los vertederos para residuos inertes, pueden existir diferentes opciones dependiendo de la composición del residuo. En algunos casos no es necesario la realización previa de pruebas y se admiten directamente. Se trata de los siguientes residuos:

- 10 11 03: Residuos de materiales de fibra de vidrio
- 15 01 07: Envases de vidrio
- 17 01 01: Hormigón
- 17 01 02: Ladrillos
- 17 01 03: Tejas y materiales cerámicos
- 17 01 07: Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- 17 02 02: Vidrio
- 17 05 04: Tierras y piedras
- 19 12 05: Vidrio
- 20 01 02: Vidrio
- 20 02 02: Tierras y piedras

El resto de los residuos que no figuran dentro de estas posibilidades se deben someter a una caracterización básica con el fin de conocer todos sus compuestos. Dentro de esta caracterización, se establecen una serie de valores límite para algunos parámetros.

Por un lado, se encuentran los valores límite de lixiviación de la tabla 21, los cuales se definen mediante dos ensayos, un ensayo de lixiviación y un ensayo de percolación.

**Tabla 21** - Valores límite de lixiviación para los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes según el Real Decreto 646/2020

Componente	L/S = 10 l/kg (mg/kg materia seca)	C0 (ensayo de percolación) (mg/l)
As	0,50	0,06
Ba	20,00	4,00
Cd	0,04	0,02
Cr total	0,50	0,10
Cu	2,00	0,60
Hg	0,01	0,00
Mo	0,50	0,20
Ni	0,40	0,12
Pb	0,50	0,15
Sb	0,06	0,01
Se	0,10	0,04
Zn	4,00	1,20
Cloruro	800,00	450,00
Fluoruro	10,00	2,50
Sulfato	1.000,00 (1)	1.500,00
Índice de fenol	1,00	0,30
COD (2)	500,00	160,00
STD (3)	4.000,00	(3)

- (1) Aunque el residuo no cumpla este valor correspondiente al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1500 mg/l en C0 con una relación L/S = 0,1 l/kg y 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario utilizar el ensayo de percolación para determinar el valor límite con una relación L/S = 0,1 l/kg en las condiciones iniciales de equilibrio, mientras que el valor con una relación L/S = 10 l/kg se podrá determinar, bien mediante una prueba de lixiviación por lotes, bien mediante un ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local.
- (2) Si el residuo no cumple estos valores de carbono orgánico disuelto (COD) con su propio pH, podrá alternativamente probarse con una relación L/S = 10 l/kg y un pH entre 7,5 y 8. El residuo no podrá considerarse conforme a los criterios de admisión de COD si el resultado de esta determinación no es superior a 500 mg/kg.
- (3) Los valores de sólidos totales disueltos (STD) podrán utilizarse como alternativa a los valores de sulfato y cloruro.

Por otro lado, también es necesario conocer los valores límites de contenido total de parámetros orgánicos (Tabla 22).

**Tabla 22** - Valores límite de contenido total de parámetros orgánicos para los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes según el Real Decreto 646/2020

Parámetro	Valor límite (mg/kg de materia seca)
COT (Carbono orgánico total)	30000 (1)
BTEX (Benceno, Etilbenceno, Tolueno y Xilenos)	6
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	1
Aceite mineral (C10 a C40)	500
HPA (Hidrocarburos aromáticos policíclicos, 16 congéneres) (2)	55

- (1) En el caso de la tierra, previa conformidad del órgano ambiental competente de la comunidad autónoma podrá aplicarse un valor límite más alto siempre que el carbono orgánico disuelto (COD) alcance un valor máximo de 500 mg/kg a L/S = 10 l/kg, bien con el pH propio del residuo o con un pH situado entre 7,5 y 8.
- (2) Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h),antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno.

### 3.3.2. RESIDUOS NO PELIGROSOS

En el caso de estos residuos, solo existen dos posibilidades de su admisión en el vertedero sin la necesidad de pruebas: residuos municipales no peligrosos tratados y residuos del tratamiento de residuos municipales recogido de forma separada o mezclada.

Para el resto de los residuos no peligrosos es necesario conocer y que no superen los siguientes límites de concentración (Tabla 23):

**Tabla 23** – Valores límite de concentración para los residuos no peligrosos admisibles en el vertedero para residuos no peligrosos según el Real Decreto

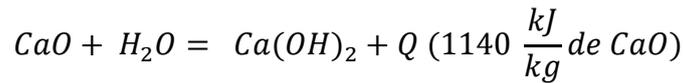
646/2020

Componente	L/S = 10 l/kg (mg/kg materia seca)	C0 (ensayo de percolación) (mg/l)
As	2,00	0,30
Ba	100,00	20,00
Cd	1,00	0,30
Cr total	10,00	2,50
Cu	50,00	30,00
Hg	0,20	0,03
Mo	10,00	3,50
Ni	10,00	3,00
Pb	10,00	3,00
Sb	0,70	0,15
Se	0,50	0,20
Zn	50,00	15,00
Cloruro	15.000,00	8.500,00
Fluoruro	150,00	40,00
Sulfato	20.000,00	7.000,00
COD (1)	800,00	250,00
STD (2)	60.000,00	(2)

- (1) Si el residuo no cumple estos valores de carbono orgánico disuelto (COD) con su propio pH, podrá alternativamente probarse con una relación L/S = 10 l/kg y un pH entre 7,5 y 8. El residuo podrá considerarse conforme a los criterios de admisión de COD si el resultado de esta determinación no es superior a 800 mg/kg.
- (2) Los valores de sólidos totales disueltos (STD) podrán utilizarse como alternativa a los valores de sulfato y cloruro.

### 3.4. ADICIÓN DE CAL

Mediante la adición de cal en los lodos de depuradora se consigue su estabilización, mejorando significativamente sus valores para sus posibles aplicaciones gracias a la neutralización del calcio y magnesio. También produce un gran aumento del contenido de materia seca de los lodos debido al consumo de agua que se genera durante la reacción de la hidratación de cal. En dicha reacción se produce una generación de calor de 1140 kJ por cada kilogramo de óxido de cal añadido:



Con este tratamiento se pueden reemplazar los fertilizantes químicos, mejorar las propiedades del suelo contribuyendo con micronutrientes y reduciendo la cantidad de patógenos.

### 3.5. OTROS MÉTODOS DE GESTIÓN

Además de los tratamientos descritos en los apartados anteriores, existen otras posibilidades para la introducción de los lodos de depuradora en la economía circular. Aunque hay que tener en cuenta que estas vías todavía se encuentran en desarrollo o no se tiene asegurada su eficacia. La implementación de tecnologías de tratamiento avanzadas y el desarrollo de productos a base de lodos de depuradora, requieren claros beneficios económicos, aunque las consideraciones económicas han disminuido a cero en los estudios de gestión de lodos procedentes de aguas residuales (Bagheri et al., 2023)

- **Licuefacción hidrotermal (HTL):** se trata de la conversión termoquímica de biomasa húmeda en un ambiente de agua caliente y presurizada para descomponer las estructuras sólidas de los biopolímeros. Es un proceso bastante simple que puede aceptar una amplia gama de materias primas (Kabir & Khalekuzzaman, 2022). Este proceso requiere consumos de hidrógeno y de electricidad para producir combustibles de hidrocarburos y gases ligeros, además de cenizas y carbón.
- **Producción de biohidrógeno:** el hidrógeno es un combustible importante porque es una fuente de energía limpia, respetuosa con el medio ambiente y sostenible (Nam, 2023). Además, contribuye significativamente con la reducción de las emisiones de carbono ya que durante su combustión solo genera agua (Šabić Runjavec et al., 2023). Se puede producir a partir de fuentes renovables de energía, así como a través de métodos biológicos ('photo-fermentation', 'dark-fermentation', electrólisis microbiana que incluyen la fermentación de materia orgánica en procesos de codigestión, donde se pueden utilizar lodos de depuradora (Nam, 2023). Otros tratamientos anteriormente descritos que generan H<sub>2</sub> son la digestión anaerobia, la codigestión y los procesos termoquímicos (pirólisis, gasificación). Con la integración de las tecnologías correctas en las plantas de tratamiento de aguas residuales, se conseguirían grandes beneficios técnicos, económicos y ambientales (Fu et al., 2021).

- **Pellets (aislamiento térmico):** los lodos de depuradora se introducen en hornos tras un drenaje. El resultado de este proceso son unos gránulos seguros para el medioambiente que se pueden utilizar en la construcción a modo de reemplazo de otros materiales como perlita o arcilla (An-nori et al., 2022; Kosinski et al., 2023).
- **Secado solar:** se opera bajo plantas de invernadero y sirve para acelerar las tasas de evaporación del agua aprovechando el efecto invernadero. Es un método de estabilización para los lodos de depuradora. (An-nori et al., 2022)

Aunque una de las más prometedoras tecnologías es la obtención de biohidrógeno (Civelek Yörüklü et al., 2023), actualmente se requieren grandes esfuerzos en I+D+I debido, principalmente, al bajo rendimiento de producción de biohidrógeno de los procesos. Por otra parte, las técnicas termoquímicas, aunque de mayor rendimiento en hidrógeno, deben tener en cuenta la elevada generación de CO<sub>2</sub>.

### 3.6. ANÁLISIS COMPARATIVO PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS Y ENFOQUE ACTUAL DE LAS PLANTAS EDAR Y EDARI

En la tabla 24 se resumen las principales ventajas y desventajas que presentan cada una de las alternativas comentadas en este proyecto:

**Tabla 24** - Resumen de las ventajas y desventajas de las posibles alternativas de gestión de lodos EDARI

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Gran reducción del volumen de lodos (hasta un 60 % en 20 días)</li> <li>✓ Eliminación de patógenos durante la fase termófila</li> <li>✓ Degradación de contaminantes orgánicos</li> <li>✓ Generación de producto final rico en C, N y P apto para uso agrícola</li> <li>✓ No requiere grandes inversiones económicas</li> <li>✓ Simplicidad tecnológica y bajo consumo energético</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Los metales pesados no se eliminan del sistemas, sólo son transformados en formas menos móviles</li> <li>✓ Se emiten gases de efecto invernadero en cantidades considerables</li> </ul>
Digestión anaerobia	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Generar mayor energía debido a la falta de O<sub>2</sub> en el proceso, produciendo un biogás rico en metano (fuente de energía renovable)</li> <li>✓ Material digerido con potencial para ser utilizado como fertilizante</li> <li>✓ El volumen final del lodo alcanza porcentajes tipo compost (~54,3% en asociación con el pretratamiento fúngico del lodo)</li> <li>✓ Los contaminantes y patógenos se eliminan de manera eficiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Degradación lenta de materia orgánica particulada</li> <li>✓ Limitada capacidad de degradar compuestos orgánicos complejos</li> <li>✓ Presencia de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el gas generado</li> <li>✓ Exceso de humedad y reducción del contenido de fracción orgánica</li> </ul>
Procesos termoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Son más rápidos y eficiente en la reducción del volumen de lodos</li> <li>✓ Más eficiente en la eliminación de organismos patógenos y compuestos tóxicos</li> <li>✓ Permitir la recuperación de metales de interés de las cenizas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Costes de implementación</li> <li>✓ Complejidad: por ejemplo, necesidad de sistema de digestión individual para cada lodo debido a la complejidad y variabilidad de composición</li> <li>✓ Dificultad para su implementación a nivel industrial</li> </ul>
Adición de cal	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reemplazar fertilizantes químicos</li> <li>✓ Mejorar las propiedades físicas de los suelos</li> <li>✓ Mayor disponibilidad de agua en el suelo</li> <li>✓ Contribución de micronutrientes y reducción de patógenos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cantidad de cal limitada</li> <li>✓ Utilización según tipo de suelo</li> </ul>

El reciente estudio de revisión de Bagheri et al., 2023, sobre las preocupaciones y motivaciones de los diferentes métodos de gestión de lodos investigadas en estudios académicos a lo largo de 50 años, ha identificado cuatro prácticas principales en la gestión de lodos de depuradora:

- a. Disposición en vertedero, que busca superar los desafíos económicos y legislativos de vertedero.
- b. Aplicación al suelo que considera los lodos de depuradora como un recurso compuesto con aplicación al suelo como principal estrategia de reciclaje.
- c. Lodos de depuradora como un producto que tiene recursos extraíbles que pueden separarse de los contaminantes.
- d. Recuperación de energía de lodos de depuradora, principalmente por digestión anaerobia.

Aunque la aplicación en tierra de lodos de depuradora tiene la mayor contribución en la investigación, este interés ha ido disminuyendo, una tendencia que está relacionada con una importante preocupación por los contaminantes. Sin embargo, los productos obtenidos de los lodos, a través de tecnologías de extracción, han ganado interés en los lodos de depuradora. Hasta cierto punto, las tendencias antes mencionadas en las investigaciones sobre la gestión de lodos están relacionadas con los cambios en la legislación y la economía global (por ejemplo, el aumento reciente en el precio de la roca de fosfato).

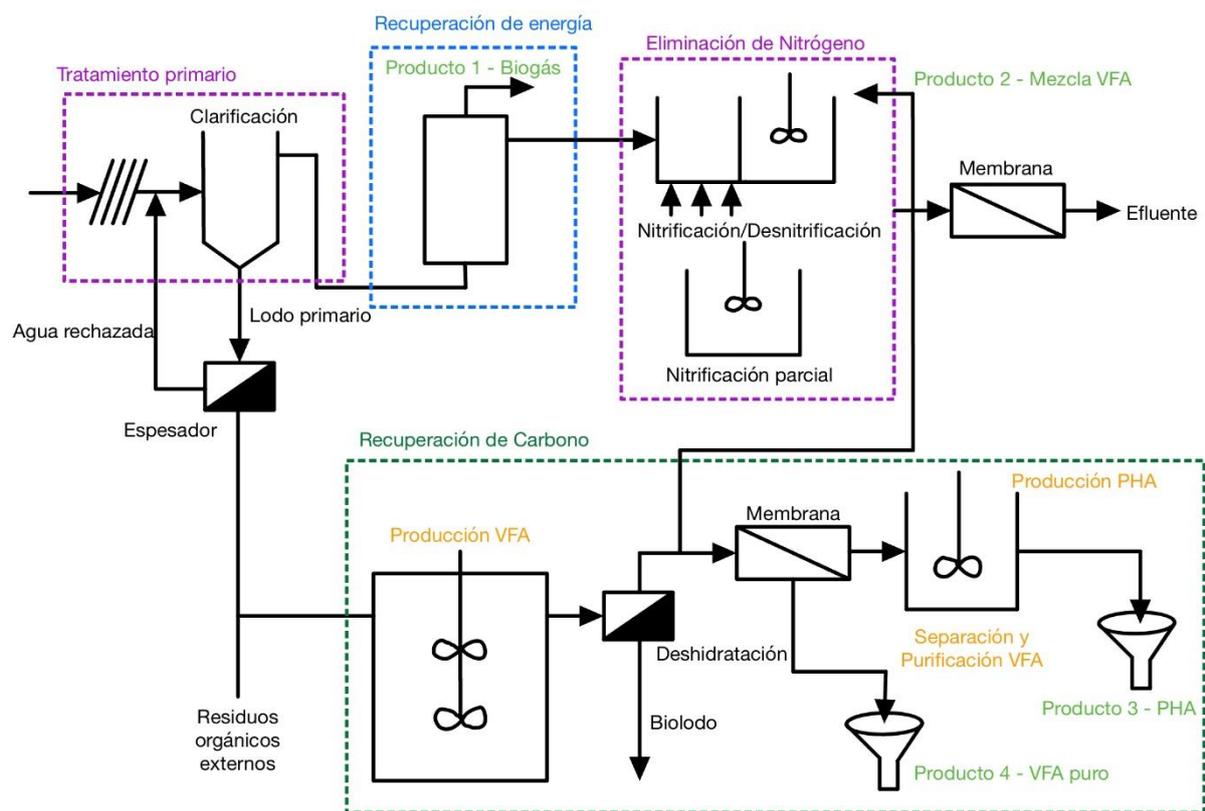
A parte de todas las posibilidades expuestas en los apartados anteriores, existe otra aplicación que se encuentra en investigación pero que podría tratarse de una buena utilización de los lodos de depuradora. Debido a los graves efectos de los productos derivados del petróleo sobre el clima, se quiere conseguir una sociedad libre de combustibles fósiles. Por lo tanto, existe la necesidad de implementar tecnologías innovadoras para producir energía y materiales funcionales a través de nuevas fuentes sostenibles de base biológica (Owusu-Agyeman et al., 2023).

Algunos recursos que se pueden recuperar a partir de las aguas residuales son el biogás, nutrientes (nitrógeno y fósforo), polihidroxialcanatos (PHA), celulosa, ácidos grasos volátiles (VFA), calor y metales (Silva & Baltrusaitis, 2021).

El principal recurso recuperado de los anteriormente mencionados es el biogás, sometiendo a los lodos de depuradora a un proceso de digestión anaerobia. Durante este tratamiento, se producen varias reacciones y, a partir de ellas, se obtienen productos intermedios como los ácidos grasos volátiles, los cuales se emplean para

sustituir el carbono de origen fósil (Owusu-Agyeman et al., 2023). Los VFA son ácidos carboxílicos de cadena corta como los ácidos acético propiónico, butírico y caproico. La recuperación de estos compuestos se combina con la recuperación de nutrientes y metales como el fósforo y el níquel (Crutchik et al., 2018). Otras aplicaciones de los VFA son la producción de PHA, hidrógeno, bioelectricidad y biodiésel (Atasoy et al., 2018).

El sistema propuesto incluye un tratamiento primario y una primera fase de recuperación de energía, donde se obtiene el primer producto, el biogás. Después, el nitrógeno se elimina mediante dos alternativas: nitrificación y posterior desnitrificación, y nitrificación parcial, antes de pasar por una membrana. En la última fase, los lodos de depuradora se mezclan con residuos orgánicos externos para producir VFA, el cual se utiliza para conseguir PHA y VFA puro (Figura 23) (Owusu-Agyeman et al., 2023).



**Figura 23** – Diagrama de la instalación de recuperación de residuos de aguas residuales

Esta posible aplicación se trata de un nuevo concepto que surge con el objetivo de conseguir a partir de las planta de tratamiento de aguas residuales biorrefinerías de

recursos donde se puedan recuperar varios productos de base biológica mientras se eliminan los contaminantes (Owusu-Agyeman et al., 2023). Esto permite una producción de energía asequible, contribuyendo a una sociedad sostenible y reduciendo el consumo de materiales de origen fósil.

#### **4. CONCLUSIONES**

Actualmente, el objetivo principal de las plantas de tratamiento de aguas residuales, tanto municipales (EDAR) como industriales (EDARI), es eliminar los contaminantes antes de que dichas aguas sean vertidas o reutilizadas en el medio ambiente y sean dañinas tanto para los ecosistemas como para la salud pública. Debido a la gran cantidad y diversidad de aguas residuales producidas, y por tanto de lodos generados, se ha creado la necesidad de buscar una aplicación a estos residuos.

Los lodos de depuradora constituyen un problema ambiental que requiere soluciones e inversiones. La solución es reintroducirlos en la economía circular, convirtiendo estos residuos en posibles recursos con grandes ventajas y evitando su depósito en vertedero. Están compuestos contienen un alto porcentaje de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, pudiendo contener cantidades variables de metales pesados, otros nutrientes y otros elementos en función de su origen.

Tras someter a estos residuos a los tratamientos oportunos, se pueden emplear para diversas finalidades, entre las que destaca el compostaje y su aplicación a suelos o como fertilizantes en forma de enmienda orgánica, mejorando las propiedades del suelo. Además, esta técnica no requiere de grandes inversiones y su aplicación a escala industrial es viable tanto técnica como económicamente.

Otra gran aplicación es la posibilidad de convertirlos en energía mediante distintos procesos, como la digestión anaerobia, la pirólisis, la combustión o la gasificación. Estos procesos permiten obtener biocombustibles, biocarbón o electricidad. El inconveniente que presentan la mayoría de ellos es la dificultad para implementarlo a nivel industrial debido al alto coste de los equipos necesarios y su rentabilidad.

Adicionalmente, han surgido una serie de vías de gestión denominadas emergentes, entre las que destacan la producción de hidrógeno y biocombustibles mediante tratamientos de codigestión y copirólisis utilizando diversos tipos de residuos

orgánicos. Así mismo, la tendencia es entender las EDAR/EDARI bajo el concepto de Biorefinería de Recursos, es decir, no solo como eliminación y transformación de contaminantes, sino también como generadoras de productos y servicios.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. An-nori, A., Ezzariai, A., El Mejahed, K., El Fels, L., El Gharous, M., & Hafidi, M. (2022). Solar Drying as an Eco-Friendly Technology for Sewage Sludge Stabilization: Assessment of Micropollutant Behavior, Pathogen Removal, and Agronomic Value. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.814590>
2. Atasoy, M., Owusu-Agyeman, I., Plaza, E., & Cetecioglu, Z. (2018). Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges. In *Bioresource Technology* (Vol. 268, pp. 773–786). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.042>
3. Autorización Ambiental Integrada AAI/018/2006, de 23 de julio de 2008. Dirección *General de Medio Ambiente*.
4. Babler, M. U., Phounglamcheik, A., Amovic, M., Ljunggren, R., & Engvall, K. (2017). Modeling and pilot plant runs of slow biomass pyrolysis in a rotary kiln. *Applied Energy*, 207, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.034>
5. Bagheri, M., Bauer, T., Ekman Burgman, L. & Wetterlund, E. (2023). Fifty years of sewage sludge management research: Mapping researchers' motivations and concerns. *Journal of Environmental Management*, 325, Part A, 116412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116412>.
6. Benlalla, A., Elmoussaouiti, M. Dahhou, M. Assafi, M. (2015) Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
7. Chen, W. H., Naveen C, Ghodke, P. K., Sharma, A. K., & Bobde, P. (2023a). Co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with other carbonaceous materials: A review on advance technologies, synergistic effect, and future prospectus. *Fuel*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128177>
8. Civelek Yörüklü, H., Coşkuner Filiz, B., Kantürk Figen, A., (2023) Use of waste-activated sludge for the production of hydrogen. In: *Materials for Hydrogen Production, Conversion, and Storage*. Book Editor(s): Inamuddin, Tariq Altalhi, Sayed Mohammed Adnan, Mohammed A. Amin Chapter 20. <https://doi.org/10.1002/9781119829584.ch20>

9. Crutchik, D., Frison, N., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2018). Biorefinery of cellulosic primary sludge towards targeted Short Chain Fatty Acids, phosphorus and methane recovery. *Water Research*, 136, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.047>
10. Decreto 14/2017, de 23 de marzo, por el que se aprueba el Plan de Residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2017 – 2023. *Boletín Oficial de Cantabria*, 63, de 30 de marzo de 2017.
11. Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 332/91, de 28 de diciembre de 2000.
12. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 312/3, de 22 de noviembre de 2008.
13. Directiva 86/278/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 181/6, de 4 de julio de 1986.
14. Elskens, m., Pussemier, L., Dumortier, P., Van Langenhove, K., Scholl, G., Goeyens, L., Focant, J.F. (2013) Dioxin levels in fertilizers from Belgium: Determination and evaluation of the potential impact on soil contamination. *Science of The Total Environment*, 454–455, 366-372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.094>.
15. Fu, Q., Wang, D., Li, X., Yang, Q., Xu, Q., Ni, B. J., Wang, Q., & Liu, X. (2021). Towards hydrogen production from waste activated sludge: Principles, challenges and perspectives. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110283>
16. Ha, M., Gutenberger, G., Ou, L. & Hawkins, T.R. (2022). *Opportunities for Recovering Resources from Municipal Wastewater*.
17. Hassan, F., Daffa Prasetya, K., Nabilah Hanun, J., Manh Bui, H., Rajendran, S., Kataria, N., Shiong Khoo, K., Wang, Y-F., You, S-J., Jiang, J-J. (2023) Microplastic contamination in sewage sludge: Abundance, characteristics, and impacts on the environment and human health. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103176. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103176>.
18. Hernández, T., Masciandaro, G., Moreno, J.I., García, C. (2006) Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludges. *Waste Management*, 26, 12, 1370-1376, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.006>.

19. Houillon, G. & Jolliet, O. (2005). *Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis*. *Journal of Cleaner Production*, 13, 3, 287-299, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.022>.
20. Hušek, M., Moško, J., & Pohořelý, M. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.11509>
21. Jagodzińska, K., Zaini, I. N., Svanberg, R., Yang, W., & Jönsson, P. G. (2021). Pyrolysis of excavated waste from landfill mining: Characterisation of the process products. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123541>
22. Kabir, S. Bin, & Khalekuzzaman, M. (2022). Co-liquefaction of organic solid waste with fecal sludge for producing petroleum-like biocrude for an integrated waste to energy approach. *Journal of Cleaner Production*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131718>
23. Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 57, pp. 1126–1140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.18>
24. Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., & Cohen, Y. (2017). From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, 46(2), 143–154. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0816-3>
25. Kosiński, P., Kask, B., Franus, M., Piłat-Rożek, M., Szulżyk-Cieplak, J., Łagód, G. (2023). The Possibility of Using Sewage Sludge Pellets as Thermal Insulation. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(2), 161-172. <https://doi.org/10.12913/22998624/159724>
26. Lehmann, J., Kuzyakov, Y., Pan, G., & Ok, Y. S. (2015). Biochars and the plant-soil interface. In *Plant and Soil*, 395, 1–2. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2658-3>
27. Mohamed, B.A., O'Boyle, M., Li, L.Y. (2023) Co-pyrolysis of sewage sludge with lignocellulosic and algal biomass for sustainable liquid and gaseous fuel production: A life cycle assessment and techno-economic analysis. *Applied Energy*, 346, 121318, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121318>.
28. Nam, J. Y. (2023). Optimum Conditions for Enhanced Biohydrogen Production from a Mixture of Food Waste and Sewage Sludge with Alkali Pretreatment. *Energies*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/en16073281>
29. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado*, 142, de 14 de junio de 2013.

30. Ortega, E. O. de M. (2009). Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España. *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Publicaciones*. <http://www.060.es> (servicios en línea/oficina virtual/Publicaciones)
31. Owusu, I., Plaza, E., Elginöz, N., Atasoy, M., Khatami, K., Pérez-Zabaleta, M., Cabrera – Rodríguez, C., Yesil, H., Tugtas, E., Calli, B. & Cetecioglu, Z. (2023). Conceptual system for sustainable and next-generation wastewater resource recovery facilities. *Science of The Total Environment*, 885, 163758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163758>.
32. Paranjpe, A., Saxena, S., & Jain, P. (2023). A Review on Performance Improvement of Anaerobic Digestion Using Co-Digestion of Food Waste and Sewage Sludge. In *Journal of Environmental Management*, 338. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117733>
33. Plan Estatal marco de gestión de residuos (PEMAR), 2016-2022. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría de estado de medio ambiente. Dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural*. pp. 182.
34. *Press corner*. European Commission - European Commission. Retrieved June 26, 2023, from [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda\\_22\\_6281](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_22_6281)
35. Punto Focal de Residuos - PFR - cantabria.es. PFR. Retrieved June 26, 2023, from <https://puntofocalderesiduos.cantabria.es/punto-focal-de-residuos>
36. Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., & Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 337, pp. 616–641). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>
37. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado*, 262, de 1 de noviembre de 1990.
38. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial del Estado*, 25, de 29 de enero de 2002.
39. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado*, 164, de 10 de julio de 2013.
40. Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado*, 171, de 19 de julio de 2005.

41. Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial del Estado*, 187, de 8 de julio de 2020.
42. Reglamento (CE) n.º 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, relativo a los abonos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 304/1, de 21 de noviembre de 2003.
43. Reglamento (CE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) n.º 2003/2003. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 170/1, de 25 de junio de 2019.
44. Ronda, A., Haro, P., & Gómez-Barea, A. (2023a). Sustainability assessment of alternative waste-to-energy technologies for the management of sewage sludge. *Waste Management*, 159, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.025>
45. Šabić Runjavec, M., Vuković Domanovac, M., & Jukić, A. (2023). Application of Industrial Wastewater and Sewage Sludge for Biohydrogen Production. *Energies*, 16. MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16052383>
46. Saldaña Escorcía, R., & Castillo Gámez, J. K. (2021). Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 175–194. <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>
47. Sarabia, A., Sanchez, J., Sanchez, J.V. (2019). Effect of the incorporation of residual sludge from water treatment on the technological properties of ceramic bodies: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 5th International Week of Science, Technology & Innovation. IOP Publishing. 1388, 012018. doi:10.1088/1742-6596/1388/1/012018
48. Silva, M., & Baltrusaitis, J. (2021). Destruction of emerging organophosphate contaminants in wastewater using the heterogeneous iron-based photo-Fenton-like process. In *Journal of Hazardous Materials Letters* (Vol. 2). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2020.100012>
49. Smith, S.R. (2009) A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 35, 1, 142-156, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.009>.
50. Stasinakis, A. S., Thomaidis, N. S., Arvaniti, O. S., Asimakopoulos, A. G., Samaras, V. G., Ajibola, A., Mamais, D., & Lekkas, T. D. (2013). Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment

plant. *Science of the Total Environment*, 463–464, 1067–1075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.087>

51. Sugurbekova, G., Nagyzbekkyzy, E., Sarsenova, A., Danlybayeva, G., Anuarbekova, S., Kudaibergenova, R., Frochot, C., Acherar, S., Zhatkanbayev, Y., & Moldagulova, N. (2023). Sewage Sludge Management and Application in the Form of Sustainable Fertilizer. *Sustainability (Switzerland)*, 15, 7). <https://doi.org/10.3390/su15076112>
52. Syed-Hassan, S. S. A., Wang, Y., Hu, S., Su, S., & Xiang, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 888–913. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262>
53. Urra, J., Alkorta, I., & Garbisu, C. (2019). Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture. *Agronomy*, 9, 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090542>
54. *WECOOP library*. (2020, April 11). *WECOOP*. <https://wecoop.eu/regional-knowledge-centre/library/>
55. Wu, M. H., Lin, C. L., Huang, W. C., & Chen, J. W. (2016). Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials*, 111, 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.146>
56. Yi, B., Chen, M., Gao, Y., Cao, C., Wei, Q., Zhang, Z., & Li, L. (2023). Investigation on the co-combustion characteristics of multiple biomass and coal under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> condition and the interaction between different biomass. *Journal of Environmental Management*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116498>
57. Zhao, Y., Yang, Z., Niu, J., Du, Z., Federica, C., Zhu, Z., Yang, K., Li, Y., Zhao, B., Helmer T., Liu, C., Emmanuel, M. (2023). Systematical analysis of sludge treatment and disposal technologies for carbon footprint reduction, *Journal of Environmental Sciences*, 128, 224–249. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.07.038>.