



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Dimensionamiento y análisis de  
sensibilidad de una línea de fangos de  
EDAR**

**Autor:**

**Suárez Heras, Andrea**

**Tutor:**

**Pérez Elvira, Sara Isabel**

**Departamento de Ingeniería Química  
y tecnología del medio ambiente**

**Valladolid, Abril de 2018**





## RESUMEN.

El proyecto se centra en el diseño de la línea de fangos de la EDAR de Valladolid, encargada de tratar un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/d de fangos para su posterior uso agrícola. Las etapas que transcurren en el proceso son, espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación.

El digestor anaerobio tiene unas dimensiones de 19 metros de altura y 24 metros de diámetro. El espesamiento y deshidratación se lleva a cabo mediante centrifugas FLOTTWEG.

Se han realizado los correspondientes estudios de impacto ambiental, de seguridad y económicos, además de un análisis de sensibilidad de la economía del proceso ante la variación de los principales parámetros económicos.

**Palabras clave:** dimensionamiento, equipos, digestión, espesamiento, deshidratación.





## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.</b>	<b>11</b>
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES.	13
1.1.1. Línea de aguas.	14
1.1.2. Línea de fangos.	20
1.1.3. Línea de gas.	28
1.2. ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE VALLADOLID.	29
1.3. LEGISLACIÓN Y GESTIÓN DE LODOS.	32
1.3.1. Legislación.	32
1.3.2. Vías de gestión de lodos.	34
<b>CAPÍTULO 2: OBJETIVO.</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 3: BASES DE DISEÑO.</b>	<b>43</b>
3.1 LOCALIZACIÓN.	45
3.2. LÍMITES DE BATERÍA.	48
3.3. BASES DE CÁLCULO.	49
3.4. CRITERIOS DE DISEÑO DEL PROCESO.	51
<b>CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN Y DIAGRAMAS DEL PROCESO.</b>	<b>53</b>
4.1. DIAGRAMA DE BLOQUES.	55
4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL.	55
4.3. DIAGRAMA DE FLUJO Y P&ID.	55
<b>CAPÍTULO 5: DIMENSIONADO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS.</b>	<b>57</b>
5.1. DIMENSIONADO DEL DIGESTOR ANAEROBIO.	59
5.2. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE ESPESAMIENTO Y DESHIDRATACIÓN.	60
5.3. SELECCIÓN DE BOMBAS.	61
5.4. DIMENSIONADO DE TUBERÍAS.	62
<b>CAPÍTULO 6: INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL.</b>	<b>63</b>
6.1. LAZOS DE CONTROL.	65



6.2. SISTEMAS DE MEDICIÓN.	65
<b>CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ECONÓMICO.</b>	<b>67</b>
7.1. COSTES FIJOS.	69
7.2. COSTES VARIABLES.	70
7.3. INGRESOS.	72
7.4. BALANCE ECONÓMICO.	72
<b>CAPÍTULO 8: IMPACTO AMBIENTAL Y SEGURIDAD.</b>	<b>73</b>
8.1. IMPACTO AMBIENTAL.	75
8.1.1. Identificación de los impactos ambientales.	75
8.1.2. Medidas preventivas.	78
8.2. SEGURIDAD Y SALUD.	80
8.2.1. Riesgos de una línea de fangos.	80
8.2.2. Medidas de prevención.	81
8.3 HAZOP	83
<b>CAPÍTULO 9: ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.</b>	<b>87</b>
9.1. VARIACIÓN DE UN PARÁMETRO EN EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.	89
9.2. VARIACIÓN DE VARIOS PARÁMETROS EN EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.	93
<b>CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES.</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>105</b>
ANEXO I. SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.	107
ANEXO II. CÁLCULOS.	111
ANEXO III. EQUIPOS.	123
ANEXO IV. PLANOS.	135



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques de una EDAR. <sup>[5]</sup> .....	13
Figura 2. Esquema general de la línea de aguas. ....	14
Figura 3. Etapas del pretratamiento. ....	14
Figura 4. Rejas. ....	15
Figura 5. Tamiz. ....	15
Figura 6. Alternativas del tratamiento primario. ....	16
Figura 7. Alternativas del tratamiento secundario. ....	17
Figura 8. Esquema de fangos activos. ....	18
Figura 9. Lecho bacteriano. ....	18
Figura 10. Alternativas del tratamiento terciario. ....	19
Figura 11. Esquema de una línea de fangos .....	20
Figura 12. Alternativas en la etapa de espesamiento. ....	21
Figura 13. Centrifuga. ....	22
Figura 14. Esquema espesamiento por gravedad. ....	22
Figura 15. Esquema espesamiento por flotación. ....	23
Figura 16. Esquema general de las etapas de la digestión anaerobia. ....	25
Figura 17. Alternativas en la etapa de deshidratación. ....	25
Figura 18. Filtro rotativo de tambor. ....	26
Figura 19. Filtro banda. ....	27
Figura 20. Filtro prensa. ....	27
Figura 21. Etapas de la línea de gas. ....	28
Figura 22. Diagrama EDAR de Valladolid. ....	31
Figura 23. Producción anual de lodos. <sup>[5]</sup> .....	34
Figura 24. Destino final de los lodos deshidratados de una EDAR. ....	35
Figura 25. Emplazamiento de la EDAR con respecto al territorio nacional. ....	45
Figura 26. Emplazamiento de la EDAR de Valladolid. ....	46
Figura 27. EDAR de Valladolid. ....	46
Figura 28. Diagrama de precipitaciones y temperaturas en Valladolid. <sup>[13]</sup> ....	47
Figura 29. Esquema del proceso de la línea de fangos de este proyecto. ....	49
Figura 30. Esquema del digestor. ....	60





## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores característicos del agua residual que llega a la EDAR. <sup>[6]</sup> .....	29
<b>Tabla 2.</b> Producción de lodos por comunidad autónoma año 2008. Fuente: Registro Nacional de Lodos.....	35
<b>Tabla 3.</b> Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria. <sup>[7]</sup> .....	36
<b>Tabla 4.</b> Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos. <sup>[7]</sup>	37
<b>Tabla 5.</b> Valores característicos del clima en Valladolid. <sup>[13]</sup> .....	48
<b>Tabla 6.</b> Bases de cálculo del proceso. <sup>[6]</sup> .....	50
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de diseño del digestor anaerobio. <sup>[1]</sup> .....	50
<b>Tabla 8.</b> Longitudes de las tuberías del proceso. ....	50
<b>Tabla 9.</b> Dimensiones del digestor anaerobio. ....	59
<b>Tabla 10.</b> Tipos de decantadoras para el espesamiento. <sup>[14]</sup> .....	60
<b>Tabla 11.</b> Decantadoras para la deshidratación. <sup>[14]</sup> .....	61
<b>Tabla 12.</b> Potencia y NPSH de las bombas del proceso. ....	61
<b>Tabla 13.</b> Diámetro y pérdida de carga de las tuberías. ....	62
<b>Tabla 14.</b> Coste de los equipos del proceso. ....	69
<b>Tabla 15.</b> Coste del personal de la línea.....	70
<b>Tabla 16.</b> Costes fijos de la planta. ....	70
<b>Tabla 17.</b> Costes asociados al consumo energético.....	70
<b>Tabla 18.</b> Datos de la dosis y precio del polielectrolito empleado y sus respectivas referencias. ....	71
<b>Tabla 19.</b> Toneladas de polielectrolito empleadas en el proceso. ....	71
<b>Tabla 20.</b> Coste de la gestión de lodos. ....	71
<b>Tabla 21.</b> Tabla resumen de los costes variables de la línea de fangos. ....	71
<b>Tabla 22.</b> Ingresos procedentes de la energía generada en la planta. ....	72
<b>Tabla 23.</b> Balance económico de la planta.....	72
<b>Tabla 24.</b> Peligros de la línea de fangos, en la fase de obra y explotación.....	77
<b>Tabla 25.</b> Variación del análisis económico con el cambio del precio de la electricidad consumida en el proceso.....	89
<b>Tabla 26.</b> Variación del análisis económico con el cambio del precio de la electricidad generada en el proceso. ....	90
<b>Tabla 27.</b> Variación del análisis económico debido al cambio del precio de la gestión de lodos. ....	91



<b>Tabla 28.</b> Variación en el análisis debido a la venta de lodos deshidratados.	92
<b>Tabla 29.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 1. ....	93
<b>Tabla 30.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 2. ....	94
<b>Tabla 31.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 2. ....	94
<b>Tabla 32.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 4. ....	94
<b>Tabla 33.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 5. ....	95
<b>Tabla 34.</b> Análisis económico debido a la variación de parámetros 6. ....	95
<b>Tabla 35.</b> Datos de partida en la etapa de espesamiento.....	113
<b>Tabla 36.</b> Datos de partida en la etapa de reacción. ....	114
<b>Tabla 37.</b> Datos de partida en la etapa de deshidratación. ....	115
<b>Tabla 38.</b> Datos de partida en el diseño del reactor. ....	116
<b>Tabla 39.</b> Tabla de los caudales y diámetros de las tuberías.....	119
<b>Tabla 40.</b> Tabla de los valores del Reynolds de las tuberías.....	120
<b>Tabla 41.</b> Perdida de carga de las tuberías. ....	120
<b>Tabla 42.</b> Caudal, potencia y NPSH de las bombas. ....	121



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.





## 1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES.

El objetivo de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) consiste en tratar las aguas residuales antes del vertido a su cauce receptor. Para ello se llevan a cabo una serie de tratamientos que tienen como finalidad eliminar residuos, grasa, aceites, sólidos sedimentables y transformar los residuos retenidos en lodos estables.

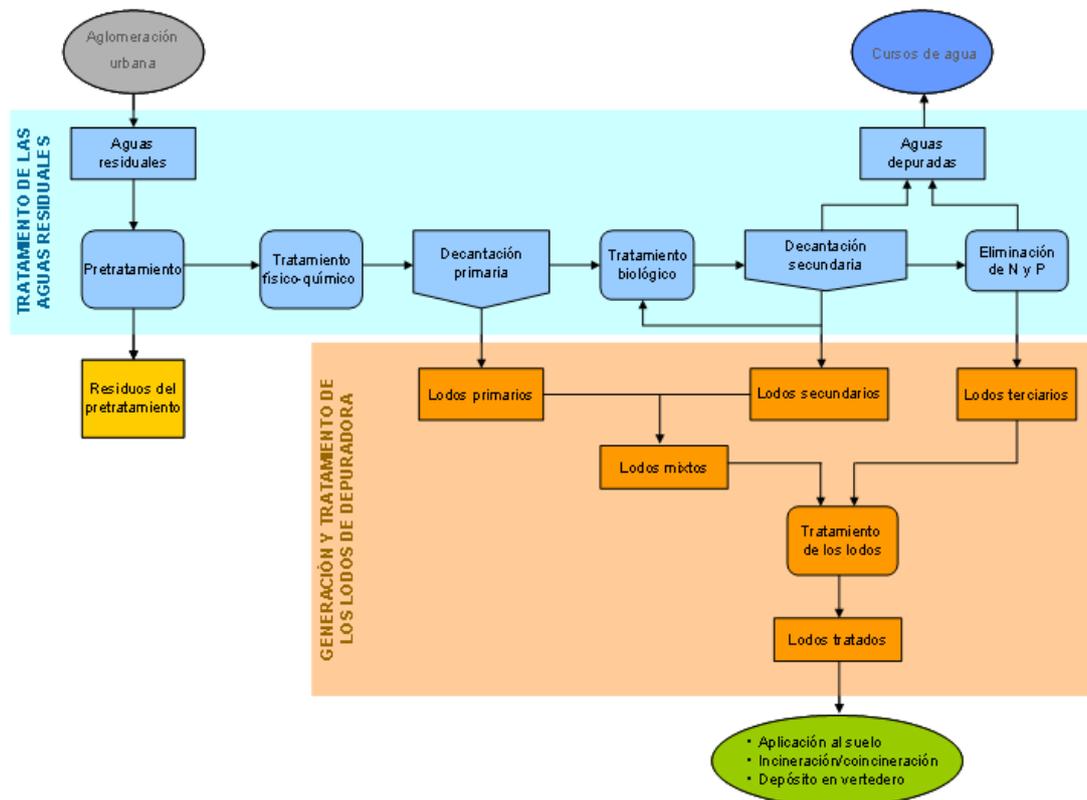


Figura 1. Diagrama de bloques de una EDAR. [5]



### 1.1.1. Línea de aguas.

De la línea de agua se extrae por una parte el agua depurada y los lodos. Está constituida por las siguientes etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario.

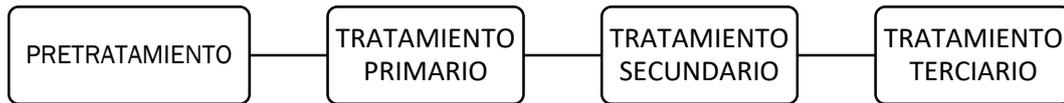


Figura 2. Esquema general de la línea de aguas.

#### PRETRATAMIENTO.

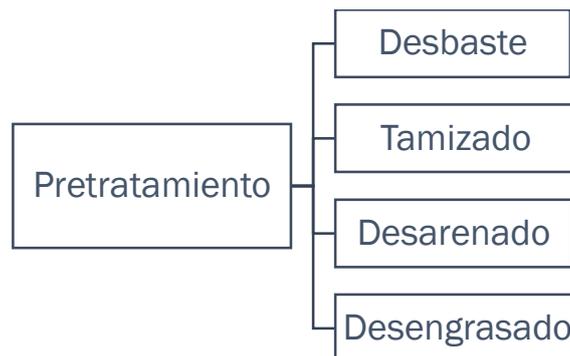


Figura 3. Etapas del pretratamiento.

El objetivo del pretratamiento es separar del agua residual, materias que debido a su naturaleza o tamaño provocarían problemas en los tratamientos posteriores. Las materias eliminadas en el pretratamiento son desde grasas, aceites hasta ramas, latas, etc.

Las operaciones de pretratamiento que tienen lugar son las siguientes:

- Desbaste: permite eliminar las materias de mayor tamaño que son arrastradas por el agua y que provocarían obstrucciones y disminución de la eficacia en los tratamientos posteriores. Se lleva a cabo mediante rejillas por las que se hace pasar el agua.



**Figura 4.** Rejas.

- Tamizado: consiste en una filtración sobre unos soportes, que permiten eliminar la materia que pueda interferir en los procesos posteriores. Esta operación elimina materiales de menos tamaño que el desbaste.

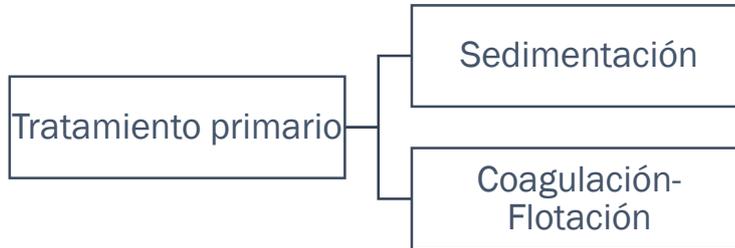


**Figura 5.** Tamiz.

- Desarenado: permite eliminar las partículas con un tamaño superior a 200 micras, para evitar que se produzcan sedimentos en las conducciones y proteger las bombas.
- Desengrasador: mediante esta operación eliminamos aceites, grasas, espumas y cualquier material flotante más ligero que el agua. La eliminación de grasa es una operación solido-líquido y el desaceitado es liquido-liquido, pero en ambas se eliminan insuflando aire, para desmenular las grasas. [1]



## TRATAMIENTO PRIMARIO.



**Figura 6.** Alternativas del tratamiento primario.

A continuación, tiene lugar el tratamiento primario que permiten reducir sólidos en suspensión. Las diferentes alternativas de este tratamiento son las siguientes:

- **Sedimentación:** este proceso permite, debido a la gravedad, que las partículas de mayor densidad se depositen en el fondo del sedimentador. Por una parte, esta operación permite eliminar aproximadamente el 60% de los sólidos en suspensión y el 30% de la materia orgánica, por otro lado, proteger los procesos posteriores de oxidación biológica, de la intrusión de fangos inertes de densidad elevada.

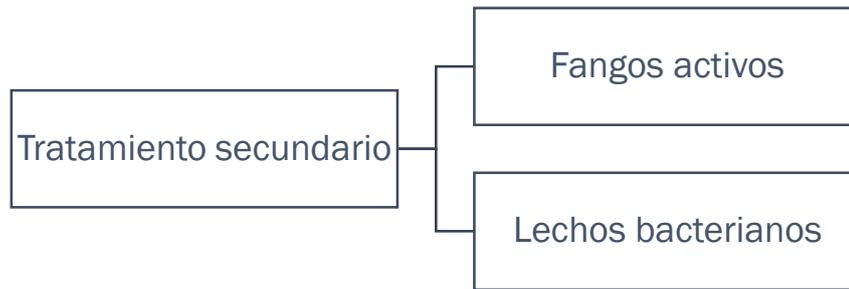
La operación se lleva a cabo en sedimentadores que tienen diferente geometría según las partículas que se quieren sedimentar, estas partículas depositadas en el fondo son arrastradas mediante rasquetas.

- **Coagulación-Flotación:** este tratamiento permite la aglomeración de partículas, para que su sedimentación sea más fácil, consta de las siguientes etapas:
  - **Coagulación:** consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de un floculo. Esto se consigue añadiendo al agua un producto químico llamado coagulante. Se utilizan sales de hierro y aluminio.
  - **Floculación:** consiste en adicionar un floculante que agrupa los floculos y forma agregados de mayor tamaño y peso, este floculante tiene una naturaleza polimérica. <sup>[1]</sup>



Tras el proceso de decantación se generan los fangos primarios, compuestos principalmente por sólidos suspendidos y materia orgánica no degradable.

## TRATAMIENTO SECUNDARIO.



**Figura 7.** Alternativas del tratamiento secundario.

El agua procedente del tratamiento anterior, se trata en un reactor biológico, en el que tiene lugar una serie de procesos de naturaleza biológica que permiten la eliminación de la materia orgánica biodegradable, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos como el nitrógeno y fósforo. Una vez pasado el tiempo de residencia necesario, la mezcla sale hacia un decantador secundario.

El proceso biológico tiene lugar en presencia de oxígeno, es decir es un proceso aerobio que se lleva a cabo por procesos catabólicos oxidativos. Requiere la presencia de un oxidante de la materia orgánica. La forma más conveniente es introducir un oxidante utilizando aireación mecánica, lo que implica altos costes operacionales del sistema de tratamiento. La mayor parte de la DQO es convertida en lodo, que cuenta con un alto contenido de material vivo que debe ser estabilizado. La temperatura óptima para este proceso se encuentra a menos de 38°C. [4]

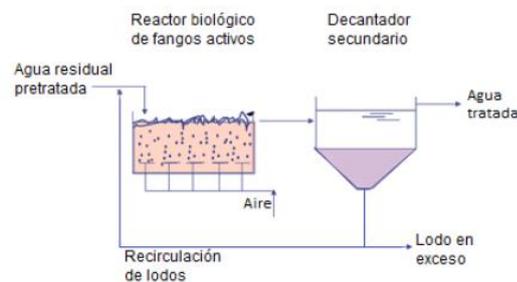


- Fangos activos.

Es un proceso en el cual el agua se estabiliza en tanques o balsas de activación. Sigue una secuencia de tres fases: anaerobia, anóxica y óxica.

Durante la primera etapa se pone en contacto el agua con un flujo de bacterias, la segunda permite la eliminación del nitrógeno por la acción de las bacterias anteriores y en la tercera se inyecta aire a través de difusores.

Posteriormente el licor de la mezcla se envía a un decantador secundario, que separa el agua depurada y los fangos secundarios. Un porcentaje de estos se recircula al depósito de aireación para mantener una concentración suficiente de biomasa activa. <sup>[1][2]</sup>



**Figura 8.** Esquema de fangos activos.

- Lechos bacterianos.

Degradan biológicamente la materia orgánica en tanques circulares, llenos de piedras o materiales sintético, formando un filtro con un gran volumen de huecos.

El agua residual se rocía sobre el lecho en el cual están adheridos los microorganismos y permiten degradar la materia orgánica. Es un proceso aerobio en el que no se recirculan los fangos, ya que los microorganismos están adheridos al lecho. <sup>[1]</sup>



**Figura 9.** Lecho bacteriano.

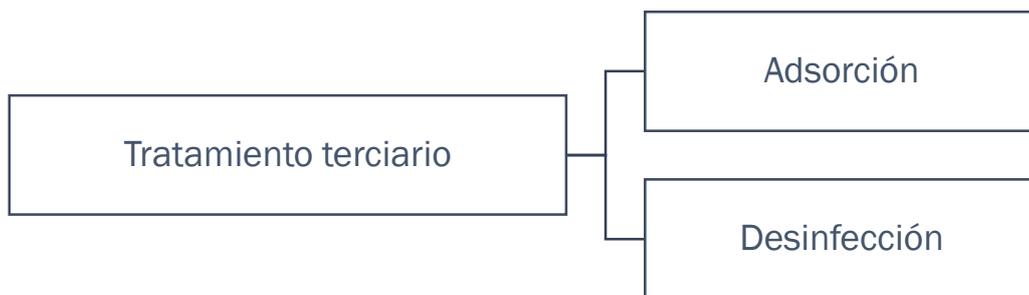


- Nitrificación-Desnitrificación

Dentro del tratamiento secundario tiene lugar la nitrificación- desnitrificación que tiene como objetivo la eliminación del nitrógeno del agua.

- Nitrificación: transforma el amonio a nitrato mediante la acción microbiana.
- Desnitrificación: los compuestos producidos en la nitrificación son reducidos a formas gaseosas de nitrógeno u óxido nitroso. [1]

### TRATAMIENTO TERCIARIO.



**Figura 10.** Alternativas del tratamiento terciario.

Este tratamiento consiste en reducir contaminantes como nutrientes inorgánicos o materia orgánica no biodegradable. Solo se emplea cuando el agua va a ser reutilizada o contiene componentes peligrosos, debido a que su adaptación es muy cara. Entre ellos destacan:

- Adsorción: elimina la materia orgánica no biodegradable del agua, esta materia se adsorbe sobre la superficie compuesta de carbón activo, resinas orgánicas, etc.
- Desinfección: permite eliminar organismos patógenos del agua. Se puede realizar mediante filtración, usando procesos de ultrafiltración y micro filtración o mediante su destrucción aplicando altas temperaturas u ozono. [1]



### 1.1.2. Línea de fangos.

En el tratamiento primario y secundario de la línea de aguas se generan unos productos denominados fangos, en los que se concentra la contaminación eliminada.

Estos fangos producidos tienen las siguientes características:

- Tienen entre un 95-99% de agua, implica que tengan un gran volumen y sean de difícil manipulación.
- Su descomposición es fácil debido su alto contenido en materia orgánica.

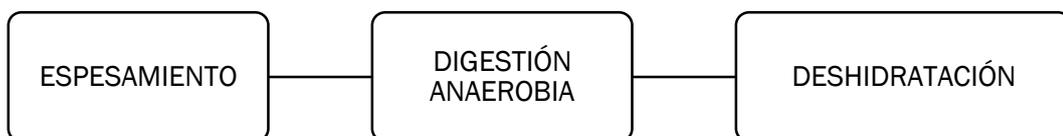
Las propiedades de los fangos dependen de las características del agua residual a tratar. Los diferentes tipos de fangos son:

- Fango primario.

Proceden de la decantación primaria y no han sufrido tratamiento biológico, por lo tanto, no se han descompuesto, lo que les hace inestables y putrescibles. Tienen un alto contenido en sólidos en suspensión y su contenido en humedad se encuentra entre 95-99%.

- Fango biológico.

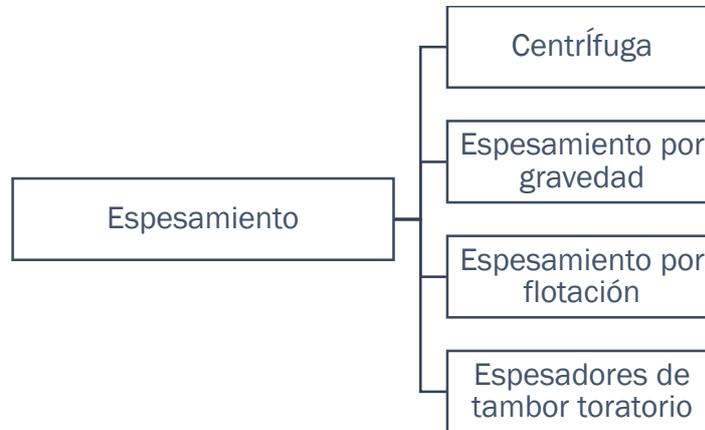
Proceden del proceso de fangos activos y su materia orgánica está descompuesta parcialmente. Tiene una humedad entre el 98-99% y son difíciles de concentrar.<sup>[1]</sup>



**Figura 11.** Esquema de una línea de fangos



## ESPESAMIENTO.



**Figura 12.** Alternativas en la etapa de espesamiento.

Esta etapa reduce el volumen debido a la eliminación de agua de los fangos que contienen más del 95%. Se pueden espesar los fangos desde una concentración del 0,8% hasta un 4% en sólidos, con lo que se obtiene una serie de ventajas:

- Disminución del volumen de los tanques posteriores al espesamiento.
- Reducción del calor necesario en la digestión anaerobia o secado térmico.
- Mejorar el rendimiento y tamaño de los equipos de deshidratación. [4]

Los lodos requieren de algún acondicionamiento químico para que se produzca la separación líquido/sólido, como es el polielectrolito. Estos polímeros tienen dos funciones en el acondicionamiento de los lodos: la primera es desestabilizar las cargas de la partícula sólida, para favorecer la aglomeración y la segunda es aglomerar las partículas en flóculos. [21]

Las principales técnicas de espesamiento son las siguientes, siendo la más utilizada el espesamiento por centrifugación:

- Espesamiento por centrifugación.

Se usa como equipo una centrifuga que permite tanto el espesamiento del fango como la posterior deshidratación. El proceso de espesado es debido a la sedimentación de las partículas bajo la influencia de fuerzas centrifugas. Mediante este equipo se consigue eliminar ochenta y cinco partes de agua, que son devueltas a la cabecera. [1]



Figura 13. Centrifuga.

- Espesamiento por gravedad.

Se lleva a cabo en tanques circulares. El fango que se alimenta sedimenta y compacta, por la parte inferior se extrae el fango espesado. El mecanismo de recogida de fangos está formado por unos rascadores que remueven el fango, promoviendo la apertura de canales que favorecen la densificación y la salida de agua. [1]

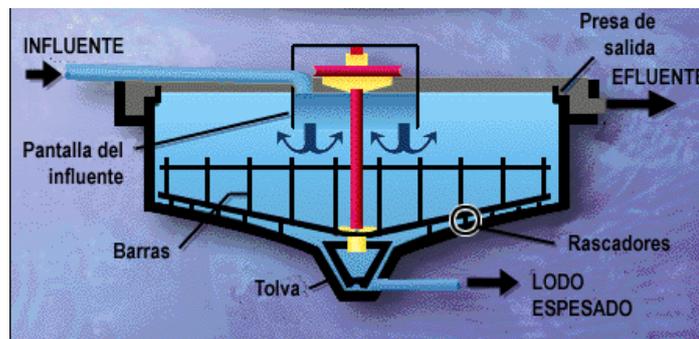


Figura 14. Esquema espesamiento por gravedad.

- Espesamiento por flotación.

Hay cuatro tipos de espesamiento por flotación: flotación al vacío, flotación por dispersión de aire, flotación biológica y flotación por aire disuelta, de las cuales esta última es la más utilizada en el espesamiento de fangos.

El agua residual entra al sistema donde se encuentra un agua súper saturada con aire diluido. A medida que estas se van mezclando, burbujas se adhieren a las partículas sólidas y son capaces de ascender hasta la superficie. Una vez que estos sólidos flotan se van creando una capa de lodo, que un recolector conduce hasta una tolva de descarga. [1]

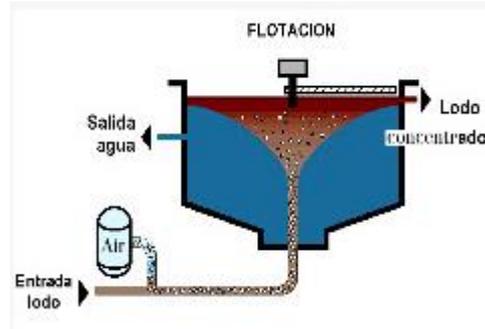


Figura 15. Esquema espesamiento por flotación.

- Espesadores de tambor rotatorio.

En este sistema el fango se mezcla con polímeros en el tambor y pasa a una serie de tamices rotativos que separan los sólidos floculados del agua. El fango sale por un extremo de los tambores y el agua separada se filtra a través de los tamices. [1]

## ESTABILIZACIÓN.

Después de la etapa de espesamiento tiene lugar la estabilización, llevada a cabo para:

- Reducir la presencia de patógenos.
- Eliminar olores desagradables.
- Reducir su putrefacción.

Existen diferentes sistemas para la estabilización del fango: estabilización térmica, química y biológica.

- Estabilización térmica: se lleva a cabo mediante la incineración o secado térmico, que permite la eliminación de la materia orgánica y los patógenos.
- Estabilización química: se añade cal al fango para elevar su pH por encima de 12. Este valor crea un entorno en el que no se permite la supervivencia de microorganismos.
- Estabilización biológica: tienen lugar reacciones metabólicas de los organismos en ausencia de oxígeno (anaerobio). [1]



### DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En la digestión anaerobia los sólidos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno. Se lleva a cabo mediante la acción de bacterias que actúan en el mismo medio, este tipo de bacterias son:

- Bacterias formadoras de ácidos, que convierten los sólidos complejos en simples, anhídrido carbónico y agua.
- Bacterias que forman metano, convierten los ácidos en metano.

Las etapas que tienen lugar en la digestión anaerobia son:

- Fase de hidrólisis.

La primera etapa es una hidrólisis de la materia orgánica, en la que se produce la transformación de las moléculas complejas a simples mediante enzimas extracelulares. Las moléculas simples se emplean como fuente de energía y de materia para las células de los microorganismos. Esta fase si se trata de residuos con alto contenido en sólidos puede convertirse en la etapa controlante de la digestión.

- Fase de acidificación o acetogénesis.

La siguiente etapa transforma los compuestos formados en la fase anterior en otros compuestos de peso molecular menor, como son alcoholes, dióxido de carbono, amoníaco, hidrogeno.

- Fase metanogénica.

Esta última etapa consiste en la transformación del ácido acético y fórmico en dióxido de carbono y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrogeno.

Las bacterias que intervienen en este proceso son anaeróbicas estrictas. Hay dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y las que transforman el dióxido de carbono e hidrogeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas). <sup>[4][3]</sup>

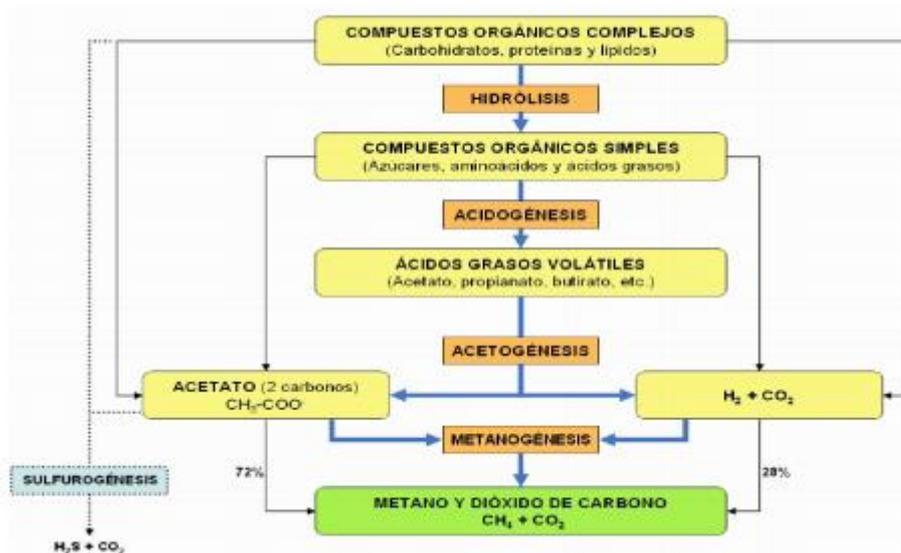


Figura 16. Esquema general de las etapas de la digestión anaerobia.

Las ventajas de la digestión anaerobia son las siguientes:

- Reduce entre un 25-40% de la materia sólida.
- Reduce la cantidad de microorganismos patógenos.
- Produce biogás valorizable.
- Su estabilización es de larga duración.

## DESHIDRATACIÓN.

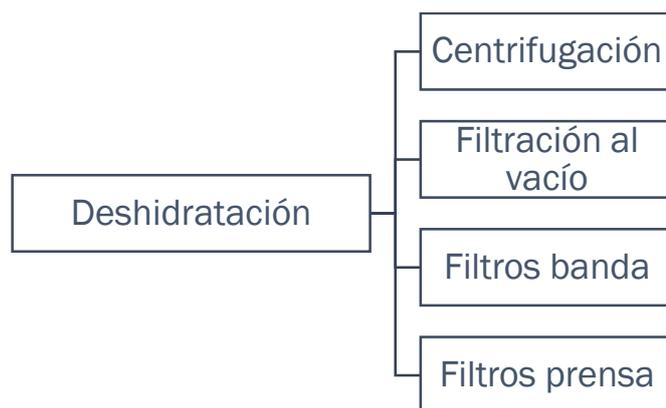


Figura 17. Alternativas en la etapa de deshidratación.



Después de la digestión anaerobia se envían los fangos procedentes a una deshidratación que permite reducir el volumen de este fango estabilizado eliminando el agua. Esta operación tiene lugar por las siguientes razones:

- Los costes de transportes del fango hasta su evacuación final son menores cuando el volumen se reduce por deshidratación.
- El fango deshidratado es más fácil de manipular.
- La deshidratación del fango es necesaria para evitar la generación de olores y que sea putrescible, así también para reducir la producción de lixiviados cuando es evacuado a vertederos. [1]

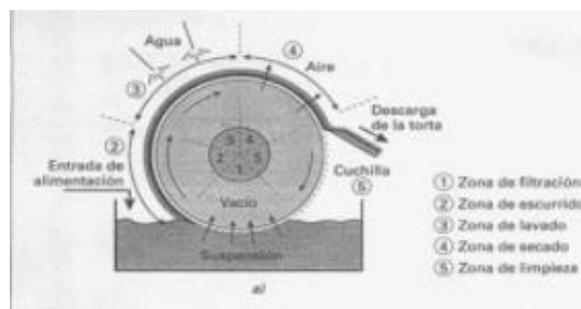
Los diferentes métodos de deshidratación son los siguientes:

- Centrifugación.

Está formado por un rotor cilindro-cónico horizontal con un tornillo sinfín girando en el mismo sentido, pero a distinta velocidad que permite arrastrar los fangos hacia su evacuación. Gracias a la fuerza centrífuga las partículas de fango son evacuadas a la periferia del rotor y el agua permanece en la zona interior. Este es el método más eficaz en la deshidratación de fangos.

- Filtración al vacío.

Consiste en un tambor cilíndrico horizontal que gira, parcialmente sumergido en el fango. Se genera el vacío en la superficie inferior del medio filtrante, por lo que el líquido es aspirado y la torta de fango queda retenida en el filtro. Se emplea en estaciones depuradoras de aguas residuales industriales.



**Figura 18.** Filtro rotativo de tambor.



- Filtros banda.

Estos dispositivos de alimentación continua incluyen el acondicionamiento químico, drenaje por gravedad y aplicación mecánica de presión para deshidratar el fango.

El fango es introducido en una zona de drenaje por gravedad donde se produce su espesado. A continuación, pasa a una zona de baja presión donde se comprime entre dos telas porosas. La torta de fango deshidratado se separa de las bandas mediante rascadores.

Con estos equipos se puede llegar a obtener fangos con un 25% de materia seca y se requiere de un elevado caudal de agua de lavado para limpiar el fango que queda pegado a las bandas. [4]



**Figura 19.** Filtro banda.

- Filtros prensa.

La deshidratación en estos equipos se lleva a cabo mediante la aplicación de una elevada presión. Consiste en unas placas colocadas de forma paralela y cubiertas por telas filtrantes. Tiene un cabezal móvil que ejerce presión sobre las placas de forma que estas al comprimiarse permiten que se filtre el agua a través de los orificios de drenaje del interior de las placas. La torta se encuentra en el interior de las placas. El funcionamiento es discontinuo y se llega a obtener un fango con una humedad del 50%.



**Figura 20.** Filtro prensa.



### 1.1.3. Línea de gas.



**Figura 21.** Etapas de la línea de gas.

Como consecuencia de las reacciones bioquímicas que tienen lugar en la digestión anaerobia del fango se produce biogás. La composición del biogás es 55-70% metano, 30-45% dióxido de carbono, 1-3% de hidrogeno, 0.5-3% de nitrógeno, 0,1-0,2% de ácido sulfúrico y trazas de vapor de agua.

El biogás se puede convertir y utilizarse como aporte de energía en el funcionamiento de la EDAR. Primeramente, se debe depurar para eliminar las sustancias que pueden disminuir su rendimiento o perjudicar el transporte. Los componentes que deben eliminarse son:

- Hidrocarburos: los que poseen flúor y cloro porque favorecen la corrosión de las partes internas de las maquinas.
- Vapor de agua: debido a que disminuye el PCI del biogás y facilita la formación de ácidos corrosivos.
- Sulfuro de hidrogeno: para prevenir la corrosión y evitar la formación de óxidos de azufre que provoca la formación de ácido sulfuroso. Para su eliminación se produce a la filtración sobre limaduras de hierro.
- Siloxanos: evitar la deposición de sílice en las partes internas de los motores.

Los componentes básicos de una instalación de limpieza de biogás son

- Secado del biogás: que permite eliminar su humedad. Se consigue mediante sistemas de condensación por enfriamiento o sistemas de adsorción con gel de sílice.
- Sistemas de limpieza: para la eliminación de sulfuro de hidrogeno se pueden usar biofiltros, lavados con sosa, pero la forma más extendida es filtrarlo sobre limaduras de hierro. Existen otros sistemas para eliminar el resto de sustancias como filtros de carbón activo o membranas. <sup>[1]</sup>



Dentro de las aplicaciones del biogás está la de refrigeración, energía eléctrica o generación de calor, aunque en las grandes plantas, la energía procedente del biogás se usa para calentar el fango crudo, cubrir las pérdidas del digestor, para el bombeo del agua residual o recirculación del agua o del fango.

## 1.2. ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE VALLADOLID.

Este proyecto se centra en el diseño de la línea de fangos de la EDAR de Valladolid, por lo que a continuación se explicará una breve descripción de esta.

La EDAR de Valladolid dispone de tres líneas (línea de aguas, fangos y gas), colocadas de modo que estén próximas unas de otras. Esta organizada en cuatro edificios: recepción, control, industrial y digestión. Se convierte en biogás aproximadamente la mitad de la materia orgánica que hay en el agua. Este biogás es utilizado para generar energía, que es utilizada en la planta mediante unos motores de los que se aprovecha el calor de sus gases y de su refrigeración para conseguir un fango seco, usado como fertilizante agrícola y forestal.

La EDAR de Valladolid tiene un caudal máximo a tratar de 3 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a una carga orgánica de 570.000 habitantes equivalentes, las aguas residuales a tratar tienen la composición de llegada reflejada en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores característicos del agua residual que llega a la EDAR. [6]

PARÁMETROS	VALORES
CAUDAL	2.000 m <sup>3</sup> /d
DQO	450-500 mg/L
DBO	200-250 mg/L
SST	35 mg/L
NITRÓGENO	35 mg/L
FÓSFORO	8-10 mg/L

Las aguas residuales desembocan a un pozo de llegada, desde donde son bombeadas hacia el inicio del pretratamiento. Si se produjesen lluvias de cierta intensidad y con ello el aumento del caudal permitido en el proceso, se llevará el exceso a un tanque de tormentas de 7.500 m<sup>3</sup> de capacidad, con el fin de



almacenar ese excedente que proviene de las primeras lluvias y ser depuradas una vez disminuya el caudal que llega a la planta.

En la entrada da EDAR se produce un bombeo adicional que permite que el agua circule por gravedad en la planta hasta su vertido al río.

El tratamiento biológico de la línea de agua se lleva a cabo mediante el sistema de fangos activos, se elimina el 90% de la demanda biológica de oxígeno y de los sólidos en suspensión, el fosforo y nitrógeno se reducen un 70%.

La línea de fangos está formada por las etapas de espesamiento del fango, digestión anaerobia, que produce biogás y por último la deshidratación del fango, mediante estos procesos se trata el fango para su posterior uso.

El biogás producido en la EDAR de Valladolid se almacena en dos gasómetros, está formado por una membrana exterior, una interior y de fondo donde se encuentra el biogás. Cuenta con una antorcha para la combustión del gas sobrante.

La energía eléctrica generada por estos motores es de 3,3 millones de kWh al año, es capaz de cubrir la demanda energética de la depuradora en su totalidad. <sup>[4]</sup>

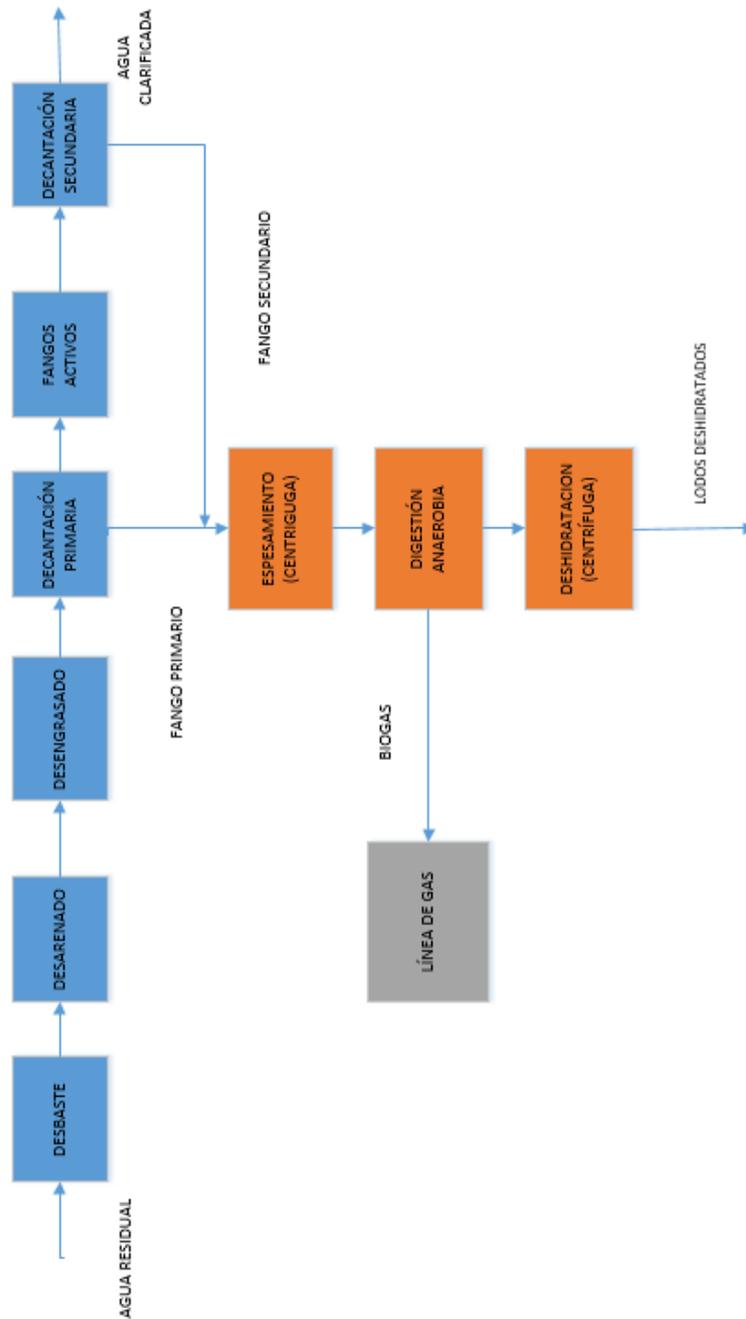


Figura 22. Diagrama EDAR de Valladolid.



## 1.3. LEGISLACIÓN Y GESTIÓN DE LODOS.

### 1.3.1. Legislación.

Se va a desarrollar la legislación que hace referencia a la gestión de los lodos, a la contaminación del aire debido a emisión de partículas y gases, y por ultimo a la contaminación acústica que puedan provocar los diferentes equipos del proceso. También se describirá la problemática de los contaminantes emergentes, debido a que se está creando una legislación para la regulación de estos.

#### **Gestión de lodos de depuradora.**

- Real decreto 1310/1990 de 29 de octubre por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.  
La regulación relativa a la utilización de lodos de depuración en el sector agrario crea el Registro Nacional de Lodos que incluye la información que deben suministrar las instalaciones depuradoras, las instalaciones de tratamiento de lodos y los gestores que realizan la aplicación agrícola. La información contenida en dicho registro debe hacerse conforme a lo establecido en la Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre la utilización de lodos de depuración en el sector agrario.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, en el que se regula la eliminación de residuos mediante deposito en vertedero.
- Real Decreto 815/2013, en el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de prevención y control integrados de la contaminación. <sup>[5]</sup>

#### **Calidad del aire.**

- Real decreto 102/2011, de 28, relativo a la mejora de la calidad del aire. <sup>[5]</sup>

#### **Control del ruido.**

- Ley de 37/2003 relativo a la mantener los niveles de ruido en esta actividad. <sup>[5]</sup>



### **Contaminantes emergentes.**

Se está trabajando en una normativa, acerca de los contaminantes emergentes (CE), que son aquellos compuestos de distinto origen o naturaleza química, cuya presencia y concentración en el medio no se considera significativa, pero que en este momento están siendo detectados y pueden tener un impacto ecológico y en la salud humana.

Este tipo de contaminantes provienen de aguas residuales de tipo doméstico e industrial, de los efluentes hospitalarios, de las actividades agrícolas o ganaderas, los cuales tienen un elevado número de contaminantes orgánicos específicos, cuyas consecuencias en el medio ambiente no se ha especificado y las plantas de tratamiento convencionales no están diseñadas para eliminarlos. Este tipo de contaminación está presente en los lodos deshidratados, usados como abono agrícola, debido a esto es necesario su estudio para poder determinar los posibles impactos.

Dentro de los contaminantes emergentes hay una amplia gama de componentes como son los plaguicidas, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales entre los cuales los principales serán explicados a continuación.

- *PRODUCTOS FARMACÉUTICOS.*

Los seres humanos excretan hasta el 90% de los medicamentos que ingieren, por ello se convierte en una de las principales causas de la presencia de productos farmacéuticos en el medio ambiente, además de la eliminación de estos por el inodoro sin utilizar.

La preocupación por la presencia de estos productos farmacéuticos es que han sido encontrados restos en aguas residuales potables y aunque las concentraciones son muy pequeñas, se deben estudiar las consecuencias.

- *PLAGUICIDAS.*

Los pesticidas son sustancias utilizadas a prevenir, repeler o destruir plagas. Estudios han demostrado que estos se encuentran en mayor proporción que el resto de los contaminantes emergentes, pudiendo llegar a ser tóxico e incluso cancerígeno para ciertos animales, razón por la cual también podría serlo para los seres humanos.

Los plaguicidas pueden llegar al ser humano mediante diferentes orígenes como son los alimentos de origen vegetal (frutas, verduras, cereales) o animal (carne bovina, porcina) y menor proporción por el agua, el aire. <sup>[10]</sup> <sup>[11]</sup>



- *PRODUCTOS DE CUIDADO PERSONAL.*

Son los productos destinados al uso directo con el cuerpo, que están dirigidos a cambiar el olor, aspecto y tacto. Entre ellos están los: perfumes, agentes de protección solar, repelentes de insectos, parabenos, etc. [10]

### 1.3.2. Vías de gestión de lodos.

En los últimos años se ha incrementado la producción de lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (figura 23), estos debido a sus propiedades agronómicas en el ámbito de la agricultura, son utilizados como fertilizantes y productos orgánicos en los suelos, constituyendo así un abono natural.

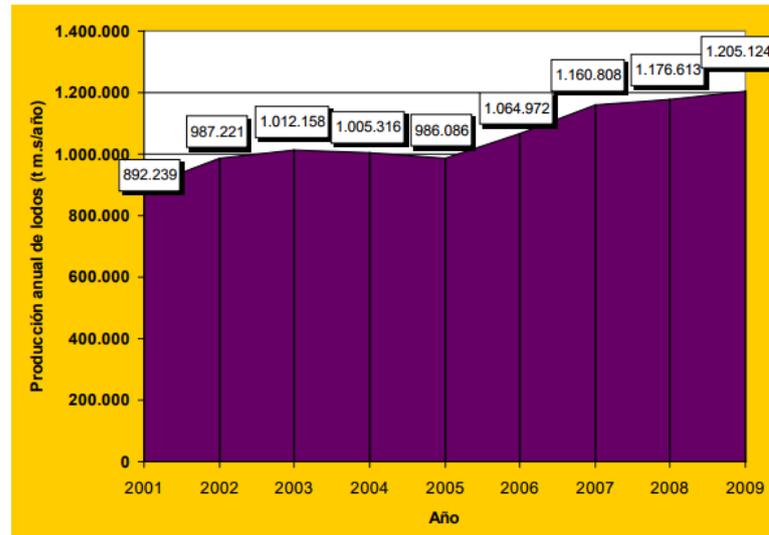
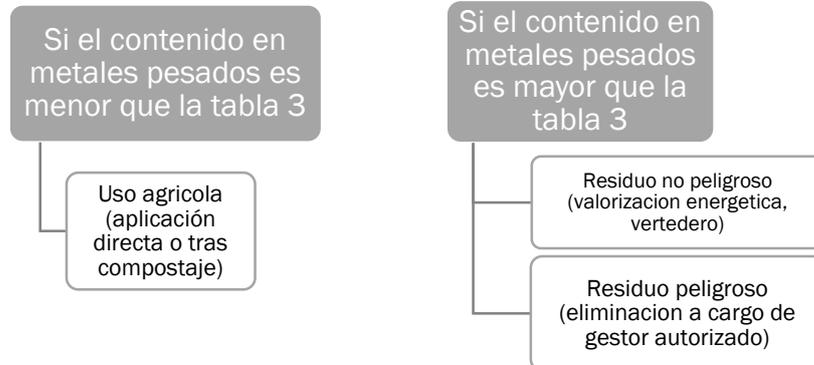


Figura 23. Producción anual de lodos. [5]

El destino principal de los lodos tratados es el agrícola, aproximadamente el 80%. El depósito en los vertederos se ha logrado reducir hasta el 8% y la incineración va en aumento, siendo en torno al 4%. Otro destino de menor importancia es el uso de estos en suelos no agrícolas. [5]



## Destino final de los lodos



**Figura 24.** Destino final de los lodos deshidratados de una EDAR.

El destino final de los lodos se muestra en la tabla 2, detallado por comunidades autónomas:

**Tabla 2.** Producción de lodos por comunidad autónoma año 2008. Fuente: Registro Nacional de Lodos.

Comunidad Autónoma	Lodos de depuradora producidos (t m.s.)	Lodos de depuradora utilizados en suelos agrícolas (t m.s.)	Lodos eliminados en vertedero (t m.s./año)	Lodos incinerados (t m.s./año)
Andalucía	100.086	85.498	12.649	0
Aragón	31.057	10.860	197	20.000
Asturias (Principado de)	2.229	1.413	791	0
Baleares (Illes)	66.811	59.442	7.369	0
Canarias	21.763	60	19.504	0
Cantabria	9.523	247	8.146	0
Castilla-La Mancha	47.310	39.704	1.676	0
Castilla y León	45.381	38.548	6.440	0
Cataluña	309.960	163.944	58.563	0
Ceuta - Melilla	1.460	0	0	1.460
Extremadura	9.430	6.114	3.316	0
Galicia	66.828	57.374	6.312	293
La Rioja	14.769	14.747	1	0
Madrid (Comunidad de)	238.229	156.819	6.254	2.458
Murcia (Región de)	10.558	8.848	1.710	0
Navarra (Comunidad Foral de)	9.794	9.475	0	0
País Vasco	24.399	1.729	9.126	13.544
Valenciana (Comunidad)	167.027	154.680	5.330	5.905
<b>ESPAÑA</b>	<b>1.176.614</b>	<b>809.502</b>	<b>147.384</b>	<b>43.660</b>



## USO COMO FERTILIZANTE AGRÍCOLA.

El fango producido en una EDAR, puede ser utilizado como abono orgánico en el sector agrario, regido por el Real Decreto 1310/1990, relativa a la protección del medio ambiente y en particular a los suelos en la utilización de lodos con fines agrícolas.

Esta directiva prohíbe el uso de lodos en la actividad agraria que estén sin tratar y de aquellos que no posean la documentación reglamentaria en la que aparezca el proceso de tratamiento y la composición de los lodos.

Se prohíbe el uso de lodos en pastos o cultivos para pienso y en los cultivos hortícolas y frutícolas durante el periodo de vegetación, excepto en los cultivos de árboles frutales. También se prohíbe su uso en cultivos hortícolas o frutícolas que estén en contacto directo con el suelo, durante un periodo de diez meses antes y durante la cosecha. [7]

## ANÁLISIS DE LODOS.

Los lodos deben analizarse, al menos, cada seis meses en la fase de producción. Si se producen cambios en la calidad del agua tratada la frecuencia de análisis debe aumentar.

los parámetros analizados una vez terminado el proceso de tratado de lodos son: materia seca, materia orgánica, pH, nitrógeno, fosforo, cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y bromo.

Los valores límites de concentración de metales pesados (mg/Kg de materia seca) en los lodos son los siguientes:

**Tabla 3.** Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria. [7]

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



## ANÁLISIS DE LOS SUELOS.

Antes de la aplicación de los lodos, debe evaluarse la concentración de metales pesados en el suelo, siendo el valor límite de la concentración de metales pesados (mg/Kg de materia seca) los siguientes:

**Tabla 4.** Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos. <sup>[7]</sup>

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

Si los suelos tuvieran una concentración superior de uno o varios metales pesados se prohibiría la utilización de los lodos. <sup>[7]</sup>

## DEPOSICIÓN EN VERTEDEROS.

Los lodos también pueden ser depositados en vertederos siempre que se cumpla el Real Decreto 1481/2001, mediante el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertederos. <sup>[5]</sup>

## INCINERACIÓN DE LOS LODOS.

La destrucción térmica de los lodos, se lleva a cabo en hornos de lecho fluidizado a temperaturas entre 760-820°C, se produce un secado y combustión rápida del lodo, hasta obtenerse un caudal de gases y cenizas a alta temperatura, que permite su valorización energética generando calor útil.

<sup>[8]</sup>





## CAPÍTULO 2: OBJETIVO.





## OBJETIVO.

El objetivo del presente proyecto es el del diseño teórico de una línea de fangos de una EDAR, encargada del tratamiento de 2.000 m<sup>3</sup>/d de fangos procedentes de la línea de aguas.

Los objetivos secundarios del proyecto son:

- Analizar las tecnologías de tratamiento de fangos, así como la selección de los equipos necesarios y dimensionado del digester.
- Realización de un análisis económico para evaluar la rentabilidad del proceso, así como un estudio de sensibilidad posterior, para calcular los posibles cambios en el presupuesto del proyecto.
- Evaluar el impacto ambiental que genera la línea de fangos.
- Valorar los posibles riesgos y aspectos de seguridad.





## CAPÍTULO 3: BASES DE DISEÑO.





### 3.1 LOCALIZACIÓN.

La línea de fangos se encuentra ubicada dentro de la estación depuradora de aguas residuales de Valladolid, situada en el Camino viejo de Simancas (Valladolid), 239. Las figuras 25, 26 y 27, muestran el emplazamiento de la planta en el territorio nacional y respecto a la ciudad de Valladolid.

Los datos principales de la localización de la ciudad de Valladolid son los siguientes:

- Altitud: 41° 39' 07' N.
- Latitud: 4° 43' 43' O.
- Altura sobre el nivel del mar: 690 msnm.
- Población: 299.715 hab. (2017).



Figura 25. Emplazamiento de la EDAR con respecto al territorio nacional.



Figura 26. Emplazamiento de la EDAR de Valladolid.

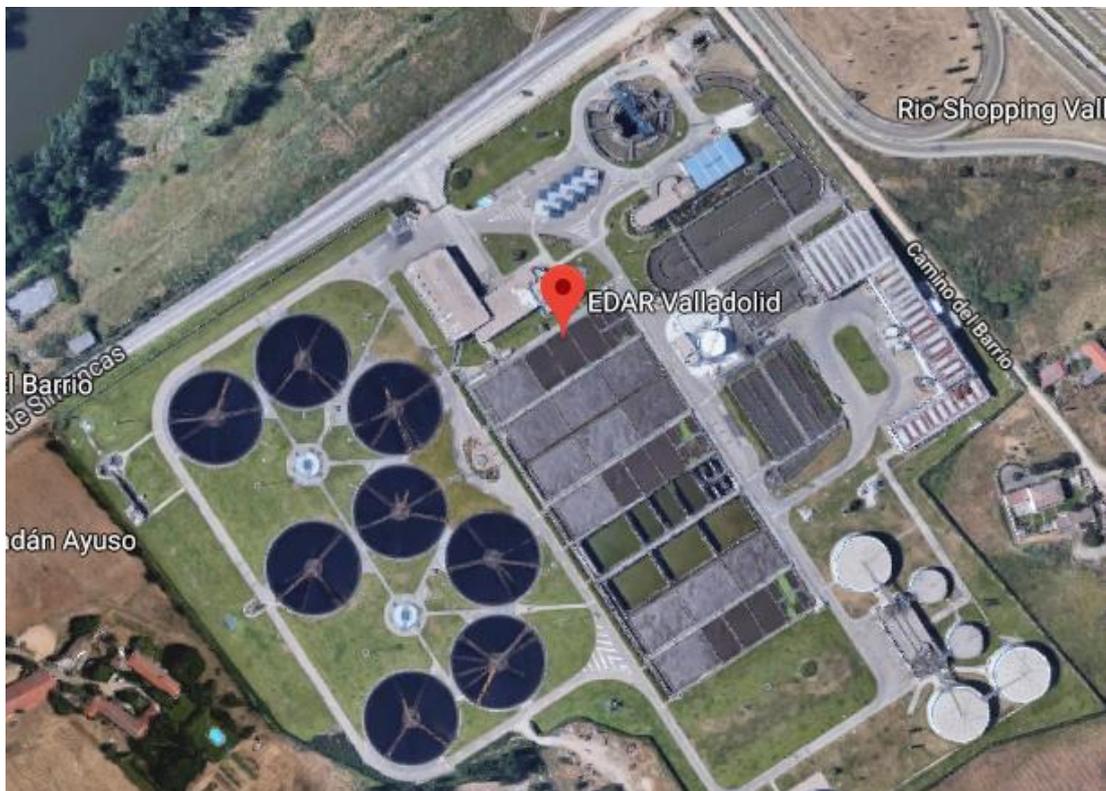


Figura 27. EDAR de Valladolid.

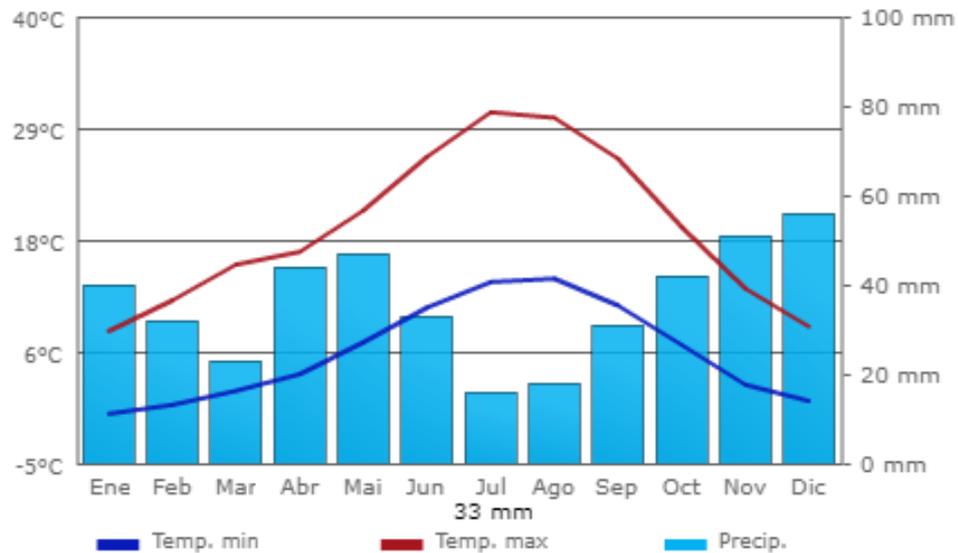


## Clima de Valladolid.

El clima de Valladolid es mediterráneo continentalizado. Esta caracterizado por inviernos muy fríos y nieblas, por el contrario, los veranos son cortos, calurosos y secos. Esto es debido a que Valladolid está situada en la cuenca del Duero, por lo que, al estar casi completamente rodeada de montañas, le aíslan del mar y le proporciona ese clima extremo.

La temperatura promedio durante los meses de verano es aproximadamente de 22 °C, estando sus temperaturas máximas comprendidas entre 30-35 °C y su temperatura mínima superior a 14 °C. Durante los meses fríos del año, de noviembre a marzo, la temperatura promedio diaria es menor de 12 °C, sin embargo, en el invierno se llegan a alcanzar temperaturas por debajo de 0 °C.

Las precipitaciones están repartidas de forma desigual durante el año, habiendo un mínimo durante el verano y un máximo en otoño y primavera. La precipitación anual es alrededor de 433 mm y su humedad relativa es aproximadamente del 64% a lo largo del año. [12]



**Figura 28.** Diagrama de precipitaciones y temperaturas en Valladolid. [13]

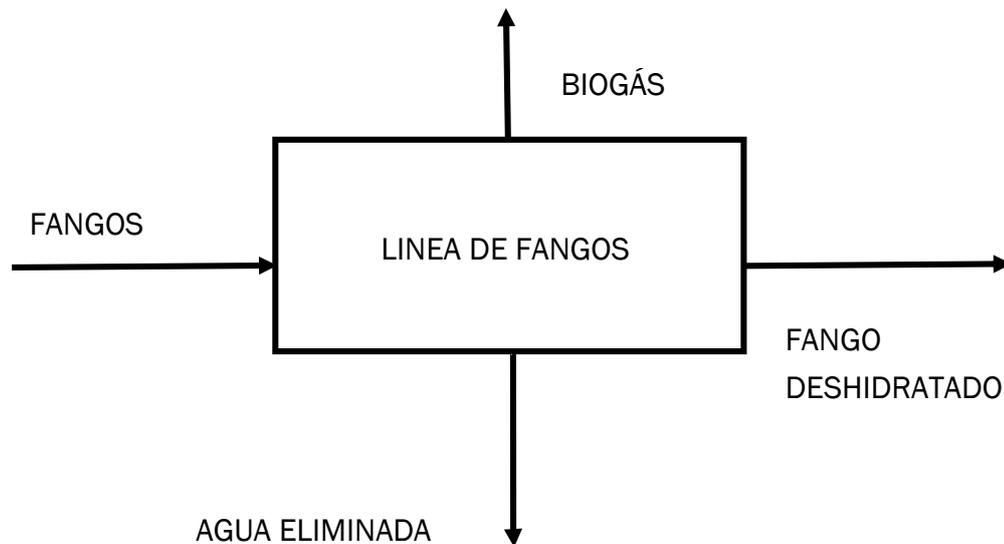


Tabla 5. Valores característicos del clima en Valladolid. <sup>[13]</sup>

Temperatura máxima media	18,6 °C
Temperatura mínima media	6,2 °C
Temperatura media	12,4 °C
Precipitaciones anuales	433 mm
Días con precipitaciones por año	71 d
Horas de sol al año	2.539 h

### 3.2. LÍMITES DE BATERÍA.

Los límites de batería de este proyecto están reflejados en la siguiente figura, quedando fuera de estos el tratamiento del biogás generado, la gestión de los fangos deshidratados y el agua eliminada en el proceso.





### 3.3. BASES DE CÁLCULO.

En la figura 29 se muestra un esquema del proceso, en el que se muestran las corrientes principales.

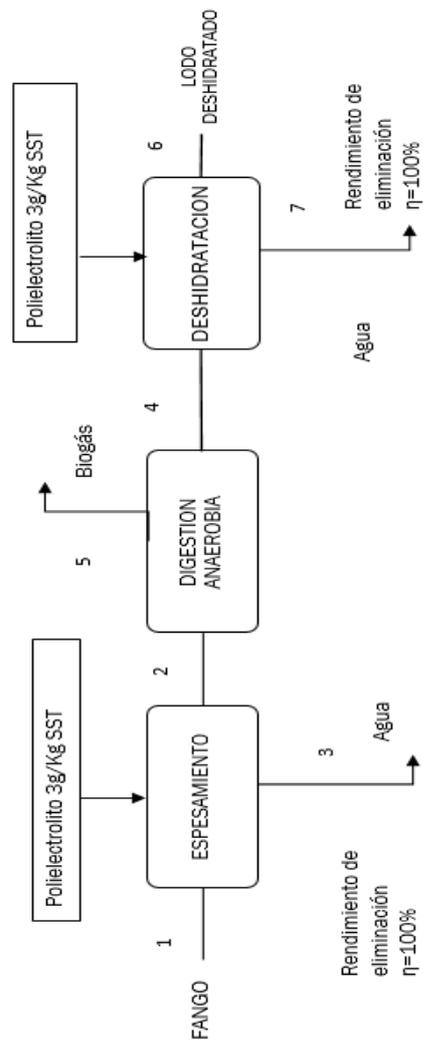


Figura 29. Esquema del proceso de la línea de fangos de este proyecto.



En la tabla 6, se detallan los caudales y composiciones que son usadas como bases de cálculo del proceso

**Tabla 6.** Bases de cálculo del proceso. [6]

PARAMETROS	VALORES
Caudal (1)	2000 m <sup>3</sup> /d
Sólidos totales (1)	14 Kg/m <sup>3</sup> ST
Sólidos totales (2)	35 Kg/m <sup>3</sup> ST
Sólidos Volátiles (4)	16 Kg/m <sup>3</sup> SV
Sólidos Volátiles (6)	200 Kg/m <sup>3</sup> SV

En cuanto a las bases de cálculo del digester anaerobio para su diseño se exponen en la tabla 7.

**Tabla 7.** Parámetros de diseño del digester anaerobio. [1]

PARÁMETROS	VALORES
CV	1.1 Kg ST/m <sup>3</sup> ·d
$\mu$	1 m/h
Kg SV reactor	15.000KgSV
Temperatura	38 °C
Rendimiento de eliminación del reactor	40%

Las longitudes adoptadas para el diseño de las tuberías están reflejadas en la tabla 8. Hacen referencia a las líneas fijadas en el diagrama de flujo del proceso ANEXO IV.

**Tabla 8.** Longitudes de las tuberías del proceso.

TUBERÍA	LONGITUD (m)
T1	100
T1´	200
T2	100
T2´	200
T3	50
T3´	500
T4	200
T4´	100
T4´´	100
T6	180
T6´	80
T7	500
T7´	50



### 3.4. CRITERIOS DE DISEÑO DEL PROCESO.

La planta de tratamiento permanecerá funcionando 335 días/año durante 24 horas. La producción se parará durante 30 días para su mantenimiento, por lo que el funcionamiento de la planta será de 8000 h/año.





## CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN Y DIAGRAMAS DEL PROCESO.





## 4.1. DIAGRAMA DE BLOQUES.

El diagrama de bloques del proceso se encuentra en el ANEXO IV.

## 4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL.

Los fangos procedentes de la decantación primaria y del tratamiento secundario son tratados mediante una serie de etapas que son el espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación, para poder ser utilizados.

El caudal de fangos se mezcla con polielectrolito en un tanque para poder llevar a cabo el espesamiento en las centrifugas, el agua eliminada en esta etapa, es recirculada a la línea de aguas. A continuación, se envía a unos digestores anaerobios donde la materia orgánica se convierte biológicamente en metano y dióxido de carbono, generándose biogás.

Una vez tratado biológicamente el fango, al igual que en la etapa de espesamiento, es mezclado con polielectrolito, para mejorar la deshidratación y enviado a unas centrifugas para eliminar el agua sobrante, también recirculado a la línea de aguas.

Finalmente, el fango deshidratado es almacenado en una tolva para su posterior uso.

## 4.3. DIAGRAMA DE FLUJO Y P&ID.

El diagrama de flujo del proceso se encuentra en el ANEXO IV.





## CAPÍTULO 5: DIMENSIONADO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS.





## 5.1. DIMENSIONADO DEL DIGESTOR ANAEROBIO.

Para el dimensionado del digestor partimos de la carga volumétrica, que nos permite calcular el volumen del reactor y con ello la altura y el diámetro.

Mediante la relación entre el volumen del reactor y el caudal determinamos el tiempo de residencia.

La velocidad ascensional nos permite calcular el caudal de recirculación en el reactor para conseguir la agitación.

En la tabla 9, se muestran las dimensiones del digestor anaerobio del proceso.

**Tabla 9.** Dimensiones del digestor anaerobio.

<b>Volumen total</b>	18910 m <sup>3</sup>
<b>Número total de reactores</b>	3
<b>Volumen de cada reactor</b>	6304 m <sup>3</sup>
<b>Diámetro</b>	19 m
<b>Altura</b>	24 m
<b>Caudal recirculación</b>	250,17 m <sup>3</sup> /h
<b>TRH</b>	24 días

Los cálculos detallados del proceso se encuentran reflejados en el ANEXO II.

### DESCRIPCIÓN DEL DIGESTOR ANAEROBIO.

Tiene forma cilíndrica y la parte inferior forma cónica con cierta inclinación para favorecer el mezclado y homogenización de los lodos. La pendiente de la cubierta superior es de 0,8 mientras que la de la parte inferior es de 1,5. La cubierta del digestor es fija y el material usado en la construcción es hormigón.

El aislante del digestor se realiza mediante un muro de hormigón de 30 cm de espesor dotado con un aislamiento a base de tableros de corcho.

El lodo se mezcla mediante recirculación bombeo y se calienta mediante intercambiadores que usan la energía obtenida en el proceso de cogeneración del biogás. <sup>[1]</sup>

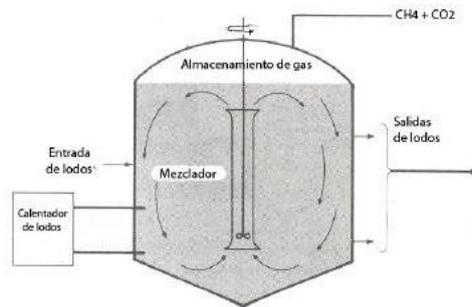


Figura 30. Esquema del digestor.

## 5.2. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE ESPESAMIENTO Y DESHIDRATACIÓN.

### ETAPA DE ESPESAMIENTO.

Esta operación se lleva a cabo mediante tres decantadoras Flottweg OSE, dentro de la gama de decantadoras se ha elegido la C4E-4, ya que es la que mejor se ajusta a la capacidad de nuestra línea de fangos.<sup>[14]</sup> El caudal a tratar por cada centrífuga es de 667 m<sup>3</sup>/d.

Tabla 10. Tipos de decantadoras para el espesamiento.<sup>[14]</sup>

DATOS TÉCNICOS DE LAS DECANTADORAS FLOTTWEG OSE					
Modelo	C2E-4	C3E-4	C4E-4	C5E-4	C7E-4
Materiales de construcción	Todas las partes en contacto con el producto están fabricadas en acero inoxidable de alta calidad, por ejemplo 1.45				
Dimensiones* (L x An x A)	2700 x 840 x 810 mm	2980 x 940 x 900 mm	3520 x 1140 x 1030 mm	4100 x 1520 x 1210 mm	4800 x 1720 x 1400 mm
Peso bruto*	1360 kg	1735 kg	2760 kg	5060 kg	8400 kg
Potencia del motor	5,5 – 7,5 kW	7,5 – 15 kW	15 – 30 kW	30 – 55 kW	55 – 110 kW
Accionamiento del tambor					
Potencia del tornillo	2,2 kW	4 kW	4 kW	5,5 kW	5,5 kW
Accionamiento del tornillo Flottweg Simp Drive®					
Capacidad*	8 – 15 m <sup>3</sup> /h	15 – 30 m <sup>3</sup> /h	30 – 60 m <sup>3</sup> /h	45 – 90 m <sup>3</sup> /h	70 – 140 m <sup>3</sup> /h

\* Los datos mencionados son valores orientativos. La capacidad real depende de las características específicas de los lodos a tratar.

El catalogo del equipo se muestra en el ANEXO III



## ETAPA DE DESHIDRATACIÓN.

Al igual que la etapa de espesamiento esta también se lleva a cabo mediante dos centrifugas Flottweg HTS, dentro de estas se elige la C4E-4. [14] Cada centrifuga trata 267 m<sup>3</sup>/d.

**Tabla 11.** Decantadoras para la deshidratación. [14]

DATOS TÉCNICOS DE LAS DECANTADORAS FLOTTWEG HTS*					
Modelo	C2E-4	C3E-4	C4E-4	C5E-4	C7E-4
Materiales de construcción	Todas las partes en contacto con el producto están fabricadas en acero inoxidable de alta calidad, por ejemplo 1.4301				
Dimensiones* (L x An x A)	2700 x 840 x 810 mm	2980 x 940 x 900 mm	3520 x 1140 x 1030 mm	4100 x 1520 x 1210 mm	4800 x 1720 x 1400 mm
Peso bruto*	1360 kg	1735 kg	2760 kg	5060 kg	8400 kg
Potencia del motor Accionamiento del tambor	7,5 – 11 kW	11 – 18,5 kW	22 – 37 kW	45 – 75 kW	75 – 135 kW
Potencia del tornillo Accionamiento del tornillo Flottweg Simp Drive®	3 kW	4 – 5,5 kW	7,5 – 11 kW	15 kW	30 kW
Capacidad*	5 – 10 m <sup>3</sup> /h	10 – 20 m <sup>3</sup> /h	20 – 40 m <sup>3</sup> /h	30 – 60 m <sup>3</sup> /h	60 – 120 m <sup>3</sup> /h

\* Los datos mencionados son valores orientativos. La capacidad real depende de las características específicas de los lodos a tratar.

El catalogo del equipo se muestra en el ANEXO III.

## 5.3. SELECCIÓN DE BOMBAS.

Las bombas seleccionadas son de la casa Dragflow EL60 RI [26], en la siguiente tabla se especifica la potencia y en NPSH de las bombas.

**Tabla 12.** Potencia y NPSH de las bombas del proceso.

	POTENCIA (kW)	NPSH
B1'	20	3,27
B2'	18	2,77
B3'	23	3,66
B4''	18	2,77
B6'	5	2,02
B7'	21	3,31

El catalogo del equipo se muestra en el ANEXO III y los cálculos en el ANEXO II.



## 5.4. DIMENSIONADO DE TUBERÍAS.

El diámetro de las tuberías se calcula a través de la velocidad y el caudal que circula por ellas.

**Tabla 13.** Diámetro y pérdida de carga de las tuberías.

TUBERÍAS	DIAMETRO (PULGADAS)	PERDIDA DE CARGA (bar)
T1	6"	0,16
T1'	4"	0,56
T2	4"	0,26
T2'	3"	0,89
T3	3"	0,14
T3'	6"	0,68
T4	4"	0,51
T4'	3"	0,51
T4''	3"	0,28
T6	3"	1,22
T6'	3"	0,81
T7	4"	0,95
T7'	3"	0,15

Los cálculos detallados se encuentran reflejados en el ANEXO II.



## CAPÍTULO 6: INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL.





## 6.1. LAZOS DE CONTROL.

Los principales lazos de control de la línea de fangos son el caudal de polielectrolito, que se añade al fango antes de las etapas de espesamiento y deshidratación, y el control de la temperatura del reactor:

- Control del caudal de electrolito.

Se realizará mediante un control de flujo, que midiendo el caudal de entrada de fango al tanque permite regular el flujo de polielectrolito que se debe añadir.

- Control de la temperatura del digestor anaerobio.

Se lleva a cabo mediante un sistema de control en cascada, que permite medir la temperatura de los lodos de recirculación a la salida del intercambiador y controlar así el flujo del fluido calefactor.

## 6.2. SISTEMAS DE MEDICIÓN.

- Medición del flujo.

Se colocarán caudalímetros para medir el flujo que circula cada tubería.

- Medición del pH en el reactor.

Se colocará un sistema de alarma de nivel alto y bajo cuando se produzca un cambio que provoque un riesgo para los microorganismos.

- Medición de la presión del reactor.

Para cuantificar la presión en el reactor se colocarán medidores de presión y válvulas de alivio de presión, que actuarán en caso de que la presión sea elevada.

- Tolva de almacenamiento.

La medición del nivel de la tolva se realizará mediante un sensor laser. Se usará también un sistema de alarma para que se avise en el caso de que el nivel de fango deshidratado en la tolva sea alto.





## CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ECONÓMICO.





La evaluación económica de este proyecto se ha realizado teniendo en cuenta los costes fijo y variables, así como los ingresos de la planta procedentes de la energía generada con la producción de biogás.

## 7.1. COSTES FIJOS.

Para estimar los costes fijos se usará en método factorial de Lang <sup>[18]</sup>, que permite calcular el coste total de la instalación de un proyecto teniendo en cuenta el factor de Lang ( $f_L$ ), que incluye costes de construcción, electricidad, tuberías, instrumentación, mano de obra, en este tipo de procesos el factor de Lang toma un valor de 3,63.

Primero se deberá calcular el coste de los equipos de la instalación y posteriormente se multiplicará por este factor.

En la tabla 14 se muestran los precios de los diferentes equipos ajustándose mediante el CEPCI <sup>[20]</sup>, según la siguiente ecuación:

$$TIC_{2017} = TIC_{2014} \cdot \frac{CEPCI_{2017}}{CEPCI_{2014}}$$

CEPCI 2017: 562,1

CEPCI 2014:576,1

**Tabla 14.** Coste de los equipos del proceso.

	PRECIO EQUIPOS €	REFERENCIA
<i>Centrífuga Espesamiento</i>	25.856	19
<i>Reactor</i>	220.000	25
<i>Centrífuga deshidratación</i>	25.856	19
<i>Bomba recirculación</i>	5.552,35	19
<i>Bomba Fangos</i>	4.239,98	19

El coste total de los equipos es 870.849,18 €, por lo tanto, se calcula el coste físico de la planta mediante la siguiente ecuación:

$$PPC = PCE \cdot 3,63 = 3.161.183 \text{ €}$$



Dentro de los costes fijos están también los costes de personal, compuestos por el jefe de planta, operarios y personal de mantenimiento.

**Tabla 15.** Coste del personal de la línea.

	Número	Sueldo €	Referencia
<i>Jefe de planta</i>	1	38.000	27
<i>Operario</i>	4	21.000	27

El coste total del personal de la línea de fangos es de 122.000 €.

Los costes fijos de la planta quedan reflejados en la tabla 16.

**Tabla 16.** Costes fijos de la planta.

<i>Coste de la planta</i>	3.161.183€
<i>Coste de personal</i>	122.000€

## 7.2. COSTES VARIABLES.

Dentro de los costes variables en esta planta tenemos los costes de la energía consumida en el proceso, el coste de la materia prima del polielectrolito y los costes de gestión de fangos.

### Costes energéticos.

El gasto energético de nuestra planta se basa en los costes bombeo, consumo energético de las centrifugas, que se encuentran reflejados en la tabla 17. El precio de la electricidad por kW/h <sup>[21]</sup> es de 0,113 €.

**Tabla 17.** Costes asociados al consumo energético.

	Consumo kW/h (año)	Costes anuales €
<i>Bombeo</i>	1.415.040	159.900
<i>Centrifuga espesamiento</i>	482.400	54.511,2
<i>Centrifuga deshidratación</i>	402.000	45.426

Los costes procedentes del consumo total de energía necesaria en la línea de fangos son de 258.937,2 €.



### Costes de materias primas.

La principal materia prima utilizada en el proceso es el del polielectrolito añadido antes de las etapas de espesamiento y deshidratación. En la tabla 18 se muestra la dosis y el precio de polielectrolito.

**Tabla 18.** Datos de la dosis y precio del polielectrolito empleado y sus respectivas referencias.

		Referencia
Dosis de polielectrolito	3 g polielectrolito/Kg de SST	23
Precio polielectrolito	1800 €/ton	28

En la siguiente tabla se muestra las toneladas necesarias de polielectrolito según los lodos generados y el coste total.

**Tabla 19.** Toneladas de polielectrolito empleadas en el proceso.

kg/año SST	Toneladas total polielectrolito	Total €
15.544.000	46,7	84.060

### Gestión de lodos.

Los lodos deshidratados generados tienen un coste de retirada que es de 8 €/Tm <sup>[27]</sup>. En la tabla 20, se muestra los costes totales debido al compost generado.

**Tabla 20.** Coste de la gestión de lodos.

Tm compost/año	Coste €/año
33.902	271.216

**Tabla 21.** Tabla resumen de los costes variables de la línea de fangos.

Coste de energía	258.937,2 €
Coste de polielectrolito	84.060€
Coste gestión de lodos	271.216€
Coste variable total	614.213,32€



### 7.3. INGRESOS.

Los ingresos obtenidos de la línea de fango, provienen de la energía procedente del biogás generado.

#### Electricidad generada

El precio de la electricidad generada <sup>[24]</sup> es de 0,066981 € kW/h. En la tabla 22, se muestran los ingresos obtenidos en la producción de electricidad.

Tabla 22. Ingresos procedentes de la energía generada en la planta.

kW/h año	precio kW/h	Ingresos € /año
1.774.0500	0,067	1.188.296,52

### 7.4. BALANCE ECONÓMICO.

Una vez que se han calculado los costes fijos, variables y los ingresos, se lleva a cabo el balance económico de la línea de fangos

Tabla 23. Balance económico de la planta.

<i>Inversión inicial</i>	3.161.183€
<i>Gastos anuales</i>	736.213,32€
<i>Ingresos</i>	1.188.296,52€

Por lo tanto, el balance anual es de **452.083,2 €**, y la línea de fangos resulta un proceso rentable.



## CAPÍTULO 8: IMPACTO AMBIENTAL Y SEGURIDAD.





## 8.1. IMPACTO AMBIENTAL.

El estudio del impacto ambiental tiene como objetivo evaluar las incidencias que tiene lugar por la ejecución de la línea de fangos.

La finalidad de este estudio consta de:

- Identificar y valorar los impactos que puedan ocurrir.
- Definir medidas correctoras para reducir o compensar las posibles alteraciones.
- Establecer un programa de vigilancia ambiental que permite asegurar el cumplimiento de las medidas adoptadas. <sup>[15]</sup>

### 8.1.1. Identificación de los impactos ambientales.

- Impactos de los residuos.

Si la cantidad a fangos a tratar es muy elevada, parte de estos suelen tener como destino final los vertederos. <sup>[16]</sup>

- Impactos sobre el suelo.

Respecto al suelo, los impactos son producidos durante la fase de construcción de la línea de fangos, debido a la construcción de la planta y posible contaminación por vertidos. Hay que tener en cuenta, a parte de la zona de línea de fangos, las obras ajenas como los accesos.

- Impacto sobre la flora.

Las principales alteraciones tienen lugar en la fase de obra, debido a la deforestación y ocupación del suelo. También serán objeto de estudio las construcciones provisionales de obras (plantas de hormigón, vertederos, almacén de maquinaria, etc.).

- Impacto sobre la fauna.

En la fase de construcción se puede producir un impacto debido a los ruidos, al trasiego de personas y a los movimientos de tierra. Debido a la creación de la línea de fangos se podría dar la transformación o destrucción del hábitat faunístico. <sup>[15]</sup>



- Impacto asociado al consumo de energía.

Referido a todo el consumo de energía eléctrica que tiene lugar en la línea de fangos tanto en la fase de obra como en la de explotación. Provoca el agotamiento de recursos no renovables como combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Este tipo de impacto se da en maquinaria que funcione a gasoil, o vehículos a disposición de la línea de fangos. <sup>[16]</sup>

- Impactos medio socioeconómico.

Estos impactos conllevan la contratación de personal tanto en la fase de obra como en la de explotación. Durante la fase de obra se puede producir molestias en la población.

- Impactos sobre el aire.

La variación de la calidad del aire, se puede ver afectada en la fase de obra por el incremento de la emisión de partículas que tiene lugar por el movimiento de tierras, maquinaria, etc.

En la fase de explotación el impacto será debido a los posibles olores y las posibles emisiones de metano y dióxido de carbono, característicos del proceso de tratamiento de fangos, provocando el calentamiento global debido a la alteración del efecto invernadero.

- Impacto sobre el ruido.

En la fase de obra los ruidos son productos de la construcción de la línea, el transporte de materiales y maquinaria.

Durante la explotación los ruidos serán producto del funcionamiento de los equipos, que son integrados en edificios insonorizados.

- Impacto sobre el paisaje.

Los impactos se producirán durante la fase de obra, debido a la pérdida de la calidad del paisaje, ya que una vez finalizada esta, solo se notarán las instalaciones de la línea de fangos.

En la tabla 24, se muestra si los diferentes impactos tienen lugar en la fase de obra o de explotación.



**Tabla 24.** Peligros de la línea de fangos, en la fase de obra y explotación.

		FASE DE OBRA	FASE DE EXPLOTACION
RESIDUOS	Producción de fangos		
FAUNA	Degradación y eliminación		
SUELOS	Obra civil		
	Contaminación por vertidos		
FLORA	Deforestación		
ENERGIA	Consumo de combustibles		
SOCIOECONOMICO	Molestia a la población		
	Creación de puestos de trabajo		
AIRE	Emisiones de partículas		
	Emisión de gases		
	Olores		
RUIDO	Obra civil		
	Funcionamiento de equipos		
PAISAJE	Pérdida de calidad		

 Se produce impacto en esa fase.

 No se produce impacto en esa fase.



### 8.1.2. Medidas preventivas.

Una vez que se han analizado y valorado los posibles impactos ambientales, se establecen una serie de medidas para corregir, disminuir o minimizar estos impactos.

- Control de los residuos.  
Se controlarán la tonelada de residuo generadas por Hm<sup>3</sup> de agua residual tratada.
- Protección de la fauna y la vegetación.
  - Se realizará un plan de recuperación de la vegetación afectada.
  - Si durante la fase de obra tiene lugar la reproducción de las especies que habitasen en dicha zona se evitaría empezar las obras en este periodo de tiempo.
- Prevención del impacto asociado al consumo de energía eléctrica.  
Se controlará el consumo de energía por volumen de agua tratada.
- Mantenimiento de la calidad del aire.
  - Control de la generación de polvo
    - Durante la fase de obra, es conveniente el riego de los terrenos y materiales, para evitar la producción de polvo.
    - Se limitará la velocidad de la maquinaria
    - Empleo de lonas y protectores de polvo en camiones.
  - Control de olores.
    - Las instalaciones se situarán alejadas de los núcleos de población.
    - Los elementos o maquinaria que puedan producir malos olores, como son los fangos, espesado o deshidratación, será convenientemente cubiertos y dotados de filtros y sistemas antiolor.
  - Control de las emisiones gaseosas.
    - Se deben cuantificar las toneladas de gas emitidas por hectómetro cúbico de agua tratada.



- Protección de suelos y residuos
  - Se retirará la capa de tierra vegetal existente de los suelos que vayan a ser ocupados para posteriormente utilizarla en el cubrimiento de las superficies cuya vegetación haya sido dañada durante la construcción.
  
- Gestión de residuos
  - Las grasas, aceites y residuos peligrosos, deberán ser retirados periódicamente.
  - Durante las obras los residuos serán almacenados en contenedores adecuados y serán retirados a la finalización de esta.
  - Los cambios de aceite de maquinaria, bombas y demás elementos se realizarán en lugares habilitados para su fin.
  
- Prevención de los niveles sonoros.
  - Como prevención, la instalación estará alejada de los núcleos de población.
  - Durante la fase de explotación, en los equipos se dispondrán de silenciadores y guardamotores.
  - Durante la fase de obra, se utilizarán vehículos y maquinaria menos ruidosos, albergando la maquinaria que pudiese producirla si es posible en edificios insonorizados.
  - Se realizará un control del mantenimiento de la maquinaria para asegurar que los niveles de ruido se encuentran dentro de los niveles pertinentes. En el caso de que se sobrepasen estos niveles, se paralizará la maquinaria hasta que sea sustituida por otra o reparada.
  - Se mediarán los niveles de decibelios de la maquinaria mediante un sonómetro.
  
- Protección del paisaje
  - Se llevará a cabo un proyecto de restauración paisajística.
  - En los alrededores de las instalaciones se llevarán a cabo plantaciones escogiéndose especies autóctonas que estén adaptadas a las condiciones climáticas del área.



- Los acabados exteriores de los edificios e instalaciones tendrán tonalidades cromáticas acordes a las características del entorno.
- Se plantarán árboles alrededor de las instalaciones para evitar que se vean los equipos.
  
- Gestión de lodos
  - Se dispondrá de equipos de desodorización en los edificios de tratamiento de los fangos.
  - Se realizarán controles periódicos de metales pesados en los fangos.
  - Se evitará en la medida de lo posible el envío de lodos a vertederos.
  - Se aplicará un control de las tierras donde el lodo es aplicado directamente al terreno. <sup>[15]</sup>

## 8.2. SEGURIDAD Y SALUD.

### 8.2.1. Riesgos de una línea de fangos.

- Emisión de sustancias peligrosas:
  - Productos químicos que se utilizan para la desulfuración y que son sustancias tóxicas y cancerígenas.
  - Agentes biológicos, que pueden causar infecciones.
  - Inhalación de polvo, presencia de patógenos.
- Peligros eléctricos, están presentes a través de los equipos como bombas, planta de cogeneración, agitadores, cuyas principales causas son debidas a un equipo eléctrico o líneas eléctricas defectuosas. Pueden causar la electrocución del personal.
- Peligros mecánicos, son los atribuibles a caídas, impactos, contusiones y cortes.
- Incendios: debidos a la posible inflamación de gases explosivos producidos en la depuradora, como puede ser el metano.



## 8.2.2. Medidas de prevención.

### PREVENCIÓN DE DAÑOS FÍSICOS.

- Se señalarán las vías de paso de los vehículos para evitar atropellos.
- Los peatones deben caminar por los pasillos señalizados.
- Las vías de circulación de los lugares de trabajo, tanto las exteriores a los edificios como las interiores (pasillos, puertas, escaleras, rampas) deben poder utilizarse conforme a su uso previsto, de forma fácil y con seguridad para las personas que circulen por ellas, evitando irregularidades.
- Se mantendrán limpios y ordenados los puestos de trabajo y las zonas de paso.
- Las salidas de emergencia, pasillos de circulación y escaleras deben estar señalizados, iluminados y despejados.
- Se colocarán barandillas en el perímetro de los pozos, balsas y tanques.

### PREVENCIÓN CONTRA INHALACIÓN DE GASES TÓXICOS.

- Se colocarán detectores fijos de sulfhídrico, conectados a alarmas acústicas.
- Se utilizarán detectores portátiles de gases. Se debe hacer cada día antes de empezar cada turno una medición de los niveles de gas.
- Cada trabajador llevara en la sala de deshidratación detectores individuales de sulfhídrico, abandonando la sala urgentemente si saltase la alarma. <sup>[17]</sup>

### PREVENCIÓN DE INCENDIOS Y GASES EXPLOSIVOS.

- Se colocarán extintores en los puntos con mayor riesgo de incendio.
- Se prohíbe fumar, llevar mecheros o útiles de ignición.
- Se airera las posibles zonas con peligro de una posible explosión de gases.

### PREVENCIÓN CONTRA DESCARGAS ELECTRICAS.

- Ningún operario no cualificado puede manipular el interior de un cuadro eléctrico.
- Se deben instalar extintores junto a cuadro eléctrico, ya que poseen riesgo de incendios.
- Se deben conectar a tierra todas las líneas y equipos para evitar chispas provocadas por electricidad estática.
- Las instalaciones eléctricas deben llevar interruptores de corte automático.



- Se evitará sobrecargar las tomas de corriente conectando varios equipos en una misma toma.
- No deben utilizarse aparatos eléctricos ni manipular instalaciones cuando estos se encuentren húmedos. <sup>[17]</sup>

#### MEDIDAS DE SEGURIDAD PERSONAL.

Cada operario debe llevar la indumentaria apropiada para evitar daños personales, está compuesta por:

- Mono de protección.
- Casco.
- Protecciones auditivas, como son los cascos, tapones u orejeras.
- Guantes.
- Calzado de seguridad.
- Gafas de seguridad.
- Mascara con filtro. <sup>[17]</sup>



## 8.3 HAZOP

Se realizará a continuación un análisis HAZOP analizando los aspectos críticos de la línea de fangos:

### Centrifuga de espesamiento.

➤ EQUIPO C-01.

PALABRA GUÍA	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES A TOMAR
<b>Más.</b>	Flujo.	Bomba trabaja a mayor velocidad.	Mayor contenido en humedad en la corriente de sólidos. Disminución de la eficacia del proceso.	Colocar dos bombas.
<b>Menos.</b>	Flujo.	Mayor espesor de los sólidos sedimentados. Bomba trabaja a menos velocidad.	Mayor contenido de sólidos en la recirculación.	Colocar dos bombas.
<b>No.</b>	Flujo.	Fallo de la bomba. Obstrucción de la tubería.	Paro del proceso de tratamiento de fangos.	Colocar dos bombas.



## Reactor.

### ➤ EQUIPO R-01

<b>PALABRA GUÍA</b>	<b>DESVIACIÓN</b>	<b>CAUSAS</b>	<b>CONSECUENCIAS</b>	<b>ACCIONES A TOMAR</b>
<b>Menos.</b>	Flujo.	Fallo de la bomba.  Trabaja a menor velocidad.	Mayor descomposición anaerobia.	Colocar dos bombas.
<b>Más.</b>	Flujo.	Fallo de la bomba  Trabaja a mayor velocidad.	Tiempo de residencia insuficiente.  Disminución de la eficacia del proceso.	Colocar dos bombas.
<b>No</b>	Flujo.	Fallo de la bomba.	Paro del proceso de tratamiento de fangos.	Colocar dos bombas.
<b>Más.</b>	Temperatura.	Aumento del flujo de calor procedente del sistema de cogeneración	Aumento de la producción de biogás.	Control de la temperatura del reactor.  Antorcha.



## Centrífuga de deshidratación.

### ➤ EQUIPO C-04

<b>PALABRA GUÍA</b>	<b>DESVIACIÓN</b>	<b>CAUSAS</b>	<b>CONSECUENCIAS</b>	<b>ACCIONES A TOMAR</b>
<b>Mas.</b>	Flujo.	Bomba trabaja a mayor velocidad.	Mayor contenido en humedad en la corriente de sólidos Disminución de la eficacia del proceso.	Colocar dos bombas.
<b>Menos.</b>	Flujo.	Mayor espesor de los sólidos sedimentados. Bomba trabaja a menos velocidad.	Mayor contenido de sólidos en la recirculación.	Colocar dos bombas.
<b>No.</b>	Flujo.	Fallo de la bomba. Obstrucción de la tubería.	Paro del proceso de tratamiento de fangos.	Colocar dos bombas.





## CAPÍTULO 9: ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.





Como se ha calculado en apartados anteriores, el proyecto proporciona unas ganancias anuales de 452.083,2 €. Para saber cómo podrán variar los costes e ingresos del proyecto, se realizará un estudio de sensibilidad de la economía que nos permita, variando diferentes parámetros como son los precios de la energía o los costes de gestión de lodos, ver como cambiaría el presupuesto de la línea de fangos.

Los diferentes parámetros que se van a modificar son:

- Precio de la energía consumida en el proceso.
- Precio de la energía generada en la línea de fangos.
- Coste de la gestión de lodos.

El estudio lo dividiremos en dos partes, en la primera se variará un único parámetro de los anteriores y en la segunda parte se variarán diferentes parámetros de forma conjunta.

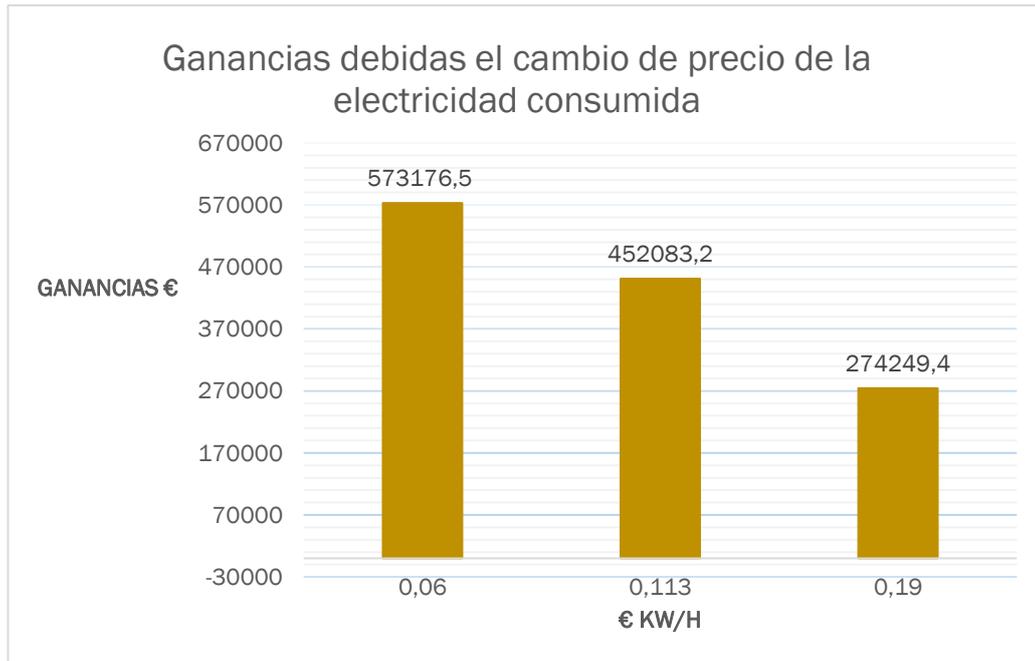
## 9.1. VARIACIÓN DE UN PARÁMETRO EN EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.

### VARIACIONES EN EL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD CONSUMIDA EN EL PROCESO.

El precio de la electricidad consumida en el proceso es de 0,113 € kW/h, se va a estudiar cómo afectara a las ganancias del proceso una variación de este, teniendo en cuenta los valores entre los que se encuentra dicho precio.

**Tabla 25.** Variación del análisis económico con el cambio del precio de la electricidad consumida en el proceso.

PRECIO ELECTRICIDAD	COSTE ELECTRICIDAD CONSUMIDA	COSTES	INGRESOS	GANANCIAS
0,113 KW/H	258.937,2 €	736.213,32€	1.188.296,5€	452.083,2€
0,19 KW/H	436.894 €	91.4047,2€	1.188.296,5€	274.249,4€
0,06 KW/H	137.966,4€	615.120€	1.188.296,5€	573.176,5€



**Gráfico 1.** Ganancias debidas al cambio del precio de la electricidad consumida.

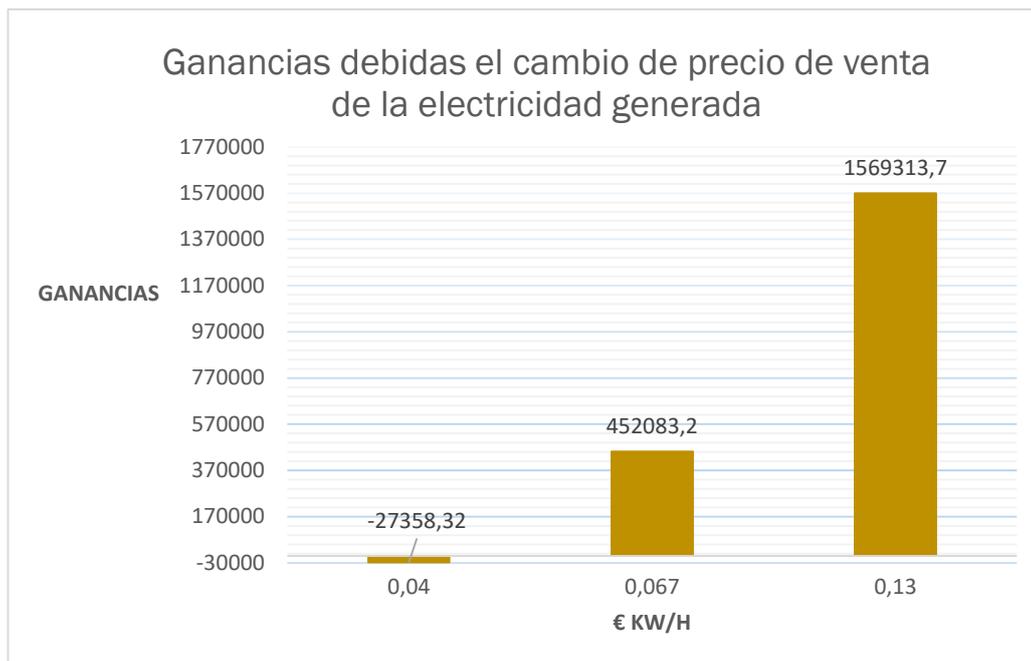
Como cabe esperar un aumento del precio de la electricidad, provoca una disminución de las ganancias anuales en la planta. A pesar de esta disminución el proceso es rentable en los casos anteriores.

### VARIACIÓN DEL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD GENERADA EN LA LÍNEA.

En este apartado se va a estudiar cómo cambia el balance económico del proyecto, debido a la variación del precio de venta de la electricidad generada en la planta.

**Tabla 26.** Variación del análisis económico con el cambio del precio de la electricidad generada en el proceso.

PRECIO ELECTRICIDAD	INGRESOS	COSTES	GANANCIAS
0,067 KW/H	1188296,5 €	736.213,32€	452.083,2€
0,13 KW/H	2.306.304€	736.213,32€	1.569.313,7€
0,04 KW/H	709.632€	736.213,32€	-27.358,32€



**Gráfico 2.** Ganancias debidas al cambio del precio de la electricidad generada.

El precio de 0,13 € kW/h <sup>[24]</sup>, es el que se paga a la EDAR, durante los primeros 15 años de su funcionamiento. Como se puede apreciar en el grafico 2, en este tiempo es donde se obtienen las mayores ganancias en la línea.

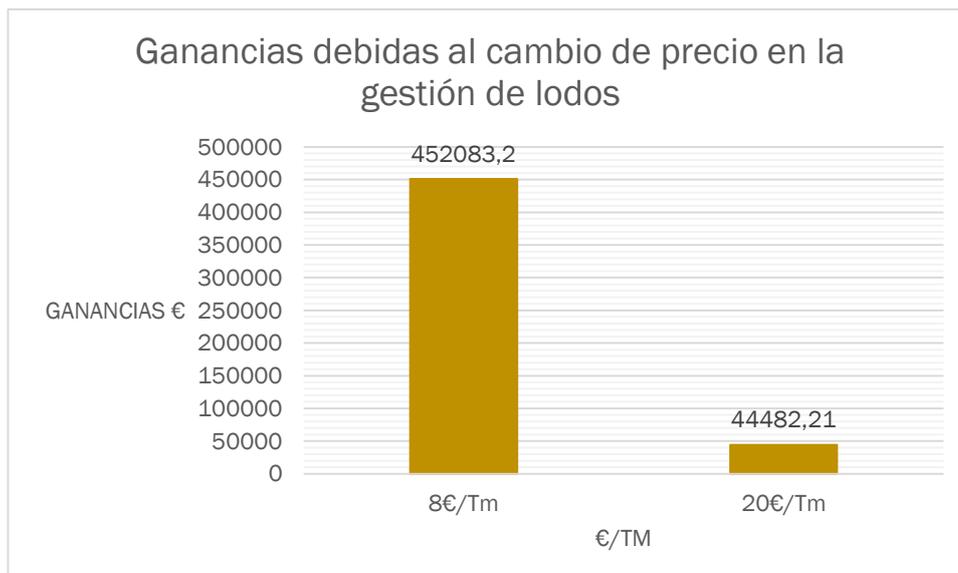
Sin embargo, si se produjese una disminución del precio, el proceso, como se puede observar en el grafico 2, provocaría pérdidas a la EDAR, convirtiéndose en un proceso no rentable.

### VARIACIÓN DE LOS COSTES DE GESTIÓN DE LODOS.

El coste de gestión de los lodos depende de la empresa encargada de su gestión.

**Tabla 27.** Variación del análisis económico debido al cambio del precio de la gestión de lodos.

PRECIO GESTION DE LODOS	PRECIO TOTAL GESTION DE LODOS	COSTES	INGRESOS	GANANCIAS
8 €/TM	271.216€	736.213,32€	1.188.296,5€	452.083,2€
20 €/TM	678.040 €	1.143.814,32€	1.188.296,5€	44482,21€



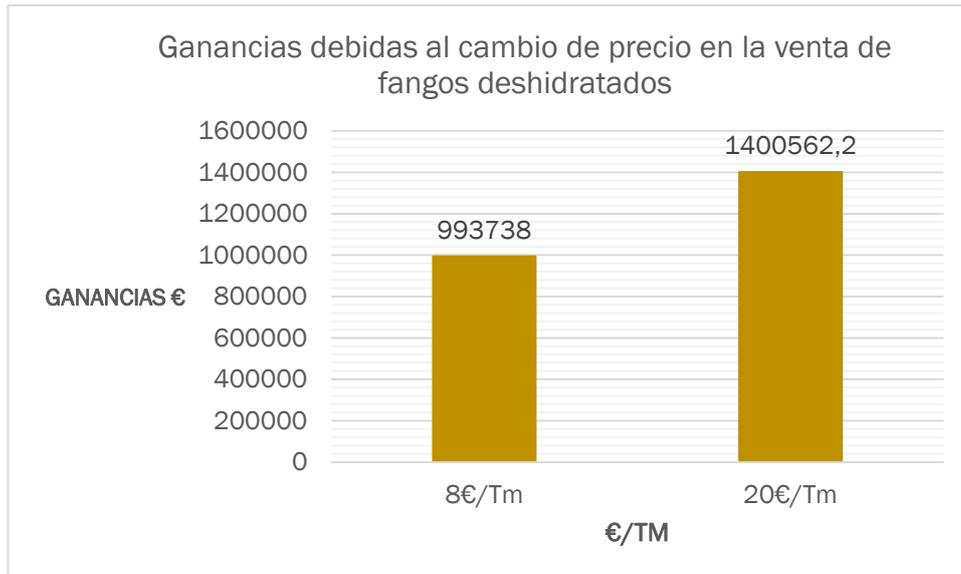
**Gráfico 3.** Variación en las ganancias debidas al cambio de precio en la gestión de lodos.

Un aumento en los costes de gestión provoca una disminución de las ganancias, como se observa en el grafico anterior.

A continuación, se va estudiar, como cambiarían las ganancias anuales, si la EDAR, recibiese dinero por la venta del lodo deshidratado generado.

**Tabla 28.** Variación en el análisis debido a la venta de lodos deshidratados.

PRECIO GESTION DE LODOS	PRECIO TOTAL GESTION DE LODOS	COSTES	INGRESOS	GANANCIAS
8 €/TM	271.216€	465.774,32€	1459.512,5€	993.738,€ €
20 €/TM	678.040 €	465.774,32€	1866.336,5€	1.400.562,2€



**Gráfico 4.** Ganancias debidas al cambio de precio en la venta de lodos deshidratados.

Como se observa en el grafico anterior al aumentar el precio de venta de la tonelada de lodo, las ganancias aumentan considerablemente.

## 9.2. VARIACIÓN DE VARIOS PARÁMETROS EN EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.

En esta segunda parte del estudio se va a analizar cómo afectaría al balance económico del proyecto, la variación de los diferentes parámetros anteriores de forma conjunta y así poder analizar el momento en el que el proceso nos proporcionaría las mayores ganancias o por el contrario el caso en el que proporcionaría las perdidas más elevadas.

- Variación 1.

Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,19 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,13 kW/h.

Precio de la gestión de lodos 8€/Tm.

**Tabla 29.** Análisis económico debido a la variación de parámetros 1.

COSTES	INGRESOS	GANANCIAS
61.5120€	2.306.304€	1.691.184 €



- Variación 2.

Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,06 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,13 kW/h.

Precio de la gestión de lodos 8€/Tm.

**Tabla 30.** Análisis económico debido a la variación de parámetros 2.

<b>COSTES</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>GANANCIAS</b>
914.047,2€	23.06.304€	1.392.256,8 €

- Variación 3.

Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,19 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,04 kW/h.

Precio de la gestión de lodos 8€/Tm.

**Tabla 31.** Análisis económico debido a la variación de parámetros 2.

<b>COSTES</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>GANANCIAS</b>
914.047,2€	709.632€	-204.415,2 €

- Variación 4

Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,19 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,04 kW/h.

Precio de la gestión de lodos 20€/Tm.

**Tabla 32.** Análisis económico debido a la variación de parámetros 4.

<b>COSTES</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>GANANCIAS</b>
1.320.871,2€	709.632€	-611.239,2 €



- Variación 5.

Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,06 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,13 kW/h.

Precio que pagan a la EDAR por los lodos 20€/Tm.

**Tabla 33.** Análisis económico debido a la variación de parámetros 5.

<b>COSTES</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>GANANCIAS</b>
343.904€	2.984.344€	264.0440 €

- Variación 6.

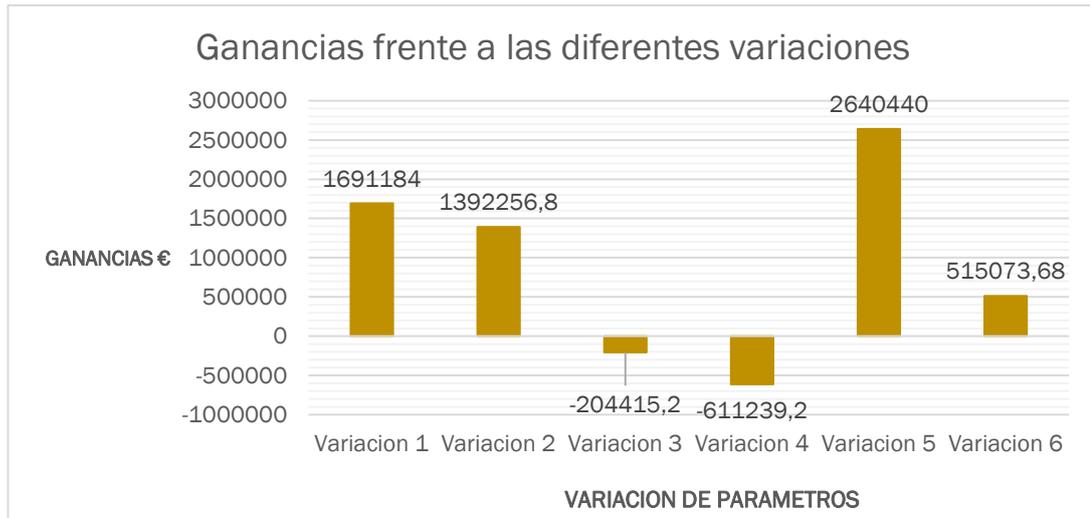
Precio de la electricidad consumida en el proceso 0,113 kW/h.

Precio de la electricidad generada en el proceso 0,04 kW/h.

Precio que pagan a la EDAR por los lodos 8€/Tm.

**Tabla 34.** Analisis económico debido a la variación de parámetros 6.

<b>COSTES</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>GANANCIAS</b>
465.774,32€	980.848€	515.073,68 €



**Gráfico 5.** Grafico que muestra las ganancias según las diferentes variaciones.

Las mayores ganancias se observan tras las variaciones 1 y 5, en las que el precio del consumo de la electricidad es el mínimo (0,06 kW/h) y el precio de la electricidad generada es el máximo (0,13 kW/h), la única diferencia entre ambos es que en la variación 5, la EDAR recibe dinero por la venta del lodo deshidratado generado, mientras que en la variación 1, esta paga por su retirada.

Las únicas variantes que no proporcionan ganancias son la 3 y la 6, esta última es la que nos proporciona las mayores pérdidas, que son las debidas a la situación más extrema, cuando el precio de la electricidad consumida es máximo (0,19 kW/h), el precio de la electricidad generada es mínimo (0,04 kW/h) y la EDAR paga (20 €/Tm) por la retirada del fango.



## CAPÍTULO 10: **CONCLUSIONES.**





## CONCLUSIONES.

Este proyecto desarrolla un diseño para el tratamiento de fangos generados en la línea de agua de agua de una EDAR.

El caudal a tratar son 2000 m<sup>3</sup>/d de fangos que pasan a través de tres centrífugas Flottweg OSE situadas en paralelo para espesarlo.

La siguiente etapa del proceso es la digestión anaerobia del fango. La planta cuenta con tres digestores anaerobios de volumen 6.034 m<sup>3</sup>, (19 m de diámetro y 24 m de altura). En estos digestores se genera un caudal de biogás de 8.064 m<sup>3</sup> biogás/d.

La última etapa de este proceso es la deshidratación del fango que se lleva a cabo mediante dos centrífugas Flottweg HTS. Se obtienen 92 m<sup>3</sup>/d, de fango deshidratado que son almacenados en tolvas para su posterior utilización.

La inversión inicial de la planta es de 3.161.183 €. El balance económico genera unas ganancias anuales de 452.083,2 €, siendo un proceso rentable. Mediante el estudio de sensibilidad de la economía se ha observado el cambio que provocaría en el balance económico del sistema, una variación de los principales parámetros económicos como son el precio de la energía y de la gestión de lodos.

Para verificar la seguridad de la planta se ha realizado el método HAZOP, para identificar los posibles riesgos del proceso y las medidas a tomar.

Se puede concluir la viabilidad del proyecto desde un punto de vista tecnológico, económico y medioambiental.





## CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA.





## BIBLIOGRAFÍA.

[1] Eddy, M. &. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización*. Madrid: Mc Graw Hill

[2] <http://www.gedar.com/> Última consulta (11 /12/2017).

[3] <http://www.agrowaste.eu/> Última consulta (15 /12/2017).

[4] <http://www.aguasdevalladolid.com> Última consulta (05 /03/2018).

[5] <http://www.mapama.gob.es> Última consulta ( 07/03/2018).

[6] Datos cedidos por jefe de planta de la EDAR de Valladolid.

[7] Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de lodos de depuración en el sector agrario. BOE-A-1990-26490

[8] Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté S.A.

[9] [http://members.tripod.com/mexico\\_h20.mx/page6.html](http://members.tripod.com/mexico_h20.mx/page6.html)

Última consulta (02/02/2018).

[10] Miriam Janet Gil, A.M. (2012). *Contaminantes emergentes en el agua, efectos y posibles tratamientos*.

[11]

[http://www.trojanuv.com/resources/trojanuv/casestudies/ECT\\_Fact\\_Sheet\\_Pesticides.pdf](http://www.trojanuv.com/resources/trojanuv/casestudies/ECT_Fact_Sheet_Pesticides.pdf) Última consulta ( 02/02/2018).

[12] <https://es.weatherspark.com/y/35791/Clima-promedio-en-Valladolid-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o> Última consulta (05 /02/2018).

[12] <https://www.climatedata.eu/climate.php?loc=spxx0195&lang=es>

Última consulta (05/02/2018).

[14] <https://www.flottweg.com/es/> Última consulta (16/02/2018).

[15]

<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/34526/32395.pdf?sequence=1> Última consulta (06/03/2018).

[16] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5831/07.pdf>

Última consulta ( 06/03/2018).



[17] Intersa. (s.f.). *Normas de seguridad en trabajos de mantenimiento en estaciones depuradoras de agua residual*. Región de Murcia

[18] <http://prjmgrcap.com/langfactorestimating.html>

Última consulta (15 /03/2018).

[19] <http://matche.com/equipcost/Default.html>

Última consulta (16/03/2018).

[20] <http://www.chemengonline.com/> Última consulta (18 /03/2018).

[21] <https://tarifaluzhora.es/> Última consulta (19 /03/2018).

[22] Escobar, J.C. (2012). *Selección de la dosis optima de polímero para el acondicionamiento y deshidratación de lodo de planta de agua potable mediante centrifugas de laboratorio*. Cancún.

[23] [http://cidta.usal.es/Cursos/simulacion/modulos/Libros/uni\\_08/9.pdf](http://cidta.usal.es/Cursos/simulacion/modulos/Libros/uni_08/9.pdf)

Última consulta ( 21/03/2018)

[24] Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. BOE-A-2007-10556

[25] Abarca Cuenca, Cristina (2016). *Diseño de una línea de fangos incluyendo ultrasonidos para la optimización de la digestión anaerobia (100.000 He)*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

[26] <http://www.dragflowpumps.com/> Última consulta (20/03/2018)

[27] Inyges Consultores. *Estudio económico de gastos de explotación y mantenimiento de la estación depuradora de aguas residuales de Losar de la Vera (Cáceres)*.

[28] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/polyelectrolyte-cationic-flocculant-polymer-60512589409.html?spm=a2700.8699010.29.9.4f8a73f1e0HF2Y&s=p>

Última consulta ( 22/03/2018).