

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

LIC. CIENCIAS AMBIENTALES



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Mejora de la biodegradabilidad aerobia de
diferentes corrientes de fango residual
procedentes de una E.D.A.R por
tratamientos con ultrasdonidos”**

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

Maria del Mar Moscardó Benet

Director:

D. Jesús Mengual Cuquerella

GANDIA, 2013

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. MARCO LEGAL.....	7
1.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	10
1.2.1. Etapas del proceso de depuración.....	10
1.2.1.1. Pretratamiento.....	10
1.2.1.2. Tratamiento primario.....	11
1.2.1.3. Tratamiento secundario.....	11
1.2.1.4. Tratamiento terciario.....	12
1.2.2. E.D.A.R Gandía y Zona Sur de la Safor.....	12
1.3. FANGOS DE DEPURADORA.....	17
1.3.1. Producción de fangos.....	17
1.3.2. Origen y características de los fangos de depuradora.....	21
1.3.3. Tratamiento de fangos en depuradoras.....	24
1.4. PROBLEMÁTICA DE LA GENERACIÓN DE FANGOS.....	31
1.4.1. Tendencias y aspectos problemáticos de la producción de fangos.....	31
1.4.2. Usos y eliminación del fango de E.D.A.R.....	32
1.4.2.1. Aplicación de fangos en suelos agrícolas.....	34
1.4.2.2. Depósito al vertedero.....	35
1.4.2.3. Incineración.....	35
1.4.2.4. Vertido al mar.....	36
1.4.2.5. Otros destinos.....	36
1.5. Tecnologías para la minimización del fango.....	37
1.6. Ultrasonidos como técnica de minimización de fangos.....	40
2. OBJETIVOS.....	44
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	47
3.1. TÉCNICAS ANÁLITICAS.....	47
3.1.1. Sólidos totales (ST), Sólidos suspendidos (SS), Sólidos Volátiles (SV).....	48
3.1.2. Determinación Demanda Química de Oxígeno (DQO _T y DQO ₅).....	51
3.1.3. Determinación Demanda Biológica de Oxígeno límite (DBO _L).....	56
3.2. DETERMINACIÓN GRADO SOLUBILIZACIÓN.....	63
3.3. RELACIÓN DBO/DQO.....	65

3.4.	TIPOS DE FANGO.....	65
3.4.1.	Fango flotado.....	67
3.4.2.	Fango mezcla.....	68
3.4.3.	Fango digerido.....	68
3.5.	Proceso experimental.....	69
3.5.1.	Equipo experimental.....	69
3.5.2.	Procedimiento experimental.....	70
4.	PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	74
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS FANGOS.....	74
4.2.	EFFECTO DE LOS ULTRASONIDOS EN LOS DISTINTOS TIPOS DE FANGOS.....	77
4.2.1.	Fango flotado.....	77
4.2.2.	Fango mezcla.....	79
4.2.3.	Fango digerido.....	81
4.3.	VARIACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD.....	83
4.3.1.	Grado de solubilización.....	84
4.3.1.1.	Velocidad de solubilización de la DQO.....	86
4.3.2.	Relación DBO/DQO (ratio).....	87
4.4.	ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FANGO.....	89
5.	CONCLUSIONES.....	93
6.	BILIOGRAFÍA.....	96

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. MARCO LEGAL.....	7
1.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	10
1.2.1. Etapas del proceso de depuración.....	10
1.2.1.1. Pretratamiento.....	10
1.2.1.2. Tratamiento primario.....	11
1.2.1.3. Tratamiento secundario.....	11
1.2.1.4. Tratamiento terciario.....	12
1.2.2. E.D.A.R Gandía y Zona Sur de la Safor.....	12
1.3. FANGOS DE DEPURADORA.....	17
1.3.1. Producción de fangos.....	17
1.3.2. Origen y características de los fangos de depuradora.....	21
1.3.3. Tratamiento de fangos en depuradoras.....	24
1.4. PROBLEMÁTICA DE LA GENERACIÓN DE FANGOS.....	31
1.4.1. Tendencias y aspectos problemáticos de la producción de fangos.....	31
1.4.2. Usos y eliminación del fango de E.D.A.R.....	32
1.4.2.1. Aplicación de fangos en suelos agrícolas.....	34
1.4.2.2. Depósito al vertedero.....	35
1.4.2.3. Incineración.....	35
1.4.2.4. Vertido al mar.....	36
1.4.2.5. Otros destinos.....	36
1.5. Tecnologías para la minimización del fango.....	37
1.6. Ultrasonidos como técnica de minimización de fangos.....	40

1. INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso imprescindible y escaso. Menos de un 3% del total de agua del planeta es dulce y se encuentra básicamente en acuíferos subterráneos, por ello debemos hacer un consumo racional y responsable de la misma. El agua, una vez utilizada en usos domésticos e industriales, está contaminada, lo que impide su vertido directo a ríos y mar. De ahí, que antes de ser vertida se proceda a su saneamiento y depuración, consiguiendo de esta forma, una calidad óptima para su vertido. Es por ello, que el saneamiento y depuración de las aguas residuales sea actualmente una necesidad.

Pero la depuración no sólo es una necesidad, sino también, una obligación legal, así lo consideran tanto la Unión Europea (Directiva 91/271/EEC), como la legislación española (Plan Nacional de sanea

1.1. Marco legal

La normativa existente en materia de aguas residuales y lodos de depuración es relativamente joven e incorpora, como uno de sus objetivos principales, la lucha contra la contaminación y el mantenimiento de unos niveles de calidad ambiental de la misma que permitan satisfacer los distintos usos a que está destinada y, más allá, las propiedades naturales aptas para la vida de los ecosistemas que de ella dependen.

A continuación se hace una breve descripción de la normativa tanto europea como estatal en materia de aguas residuales y lodos de depuración, que actualmente se encuentra vigente.

Normativa en materia de aguas residuales:

- Ley de Aguas de 1985 (B.O.E. nº 189, 8-08-1985) y Ley de Aguas 1999 (B.O.E. nº 289, 14-12-1999):

Indican al Gobierno que debe establecer las condiciones básicas para la reutilización directa de las aguas en función de los procesos de depuración, su calidad y los usos previstos.

- Directiva del Consejo (91/271/CEE) de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas:

Establece los plazos para construir depuradoras y los tamaños de población que deben de contar con una. Así mismo, establece los mecanismos y frecuencias de muestreo y el análisis de las aguas residuales. El control se basa en la determinación de los parámetros sólidos en suspensión, DBO5, DQO, fósforo y nitrógeno.

- Real Decreto Ley 11/1995 y el Real Decreto 509/1996 (transcriben la Directiva Europea 92/271/CEE):

Apunta que España deberá contar con sistemas colectores y tratamientos secundarios o proceso equivalente antes del 1 de enero del año 2006, en las poblaciones con más de 10.000 habitantes equivalentes, y en aquellas con más de 2.000 habitantes equivalentes, que viertan aguas continentales o estuarios. Esta medida permitirá alcanzar en torno al año 2012 volúmenes de agua regenerada cercanos a los 1.200 hm³/año.

- Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (B.O.E. nº 312, de 15-05-1995):

Contiene la obligación de las Comunidades Autónomas a aplicar un canon de saneamiento para hacer frente a las actuaciones derivadas de la implantación de la Directiva 91/271/CEE.

Normativa en materia de lodos de depuradora:

- Directiva 91/156/CEE de 18 de marzo de 1991, relativa a residuos transpuesta al Derecho español mediante la Ley 10/1998 de 21 de Abril de Residuos:

Los lodos de las depuradoras de aguas residuales, se encuentran clasificados con el código CER 190805 dentro del Catálogo Europeo de Residuos y a ellos hay que aplicarles todas las normas en vigor relativas a residuos.

- Resolución de 14 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Lodos de Depuradora (MIMAM):

En él se plantean unos objetivos a cumplir para finales del año 2005. En concreto, se mencionan los porcentajes de la producción total de lodos que deben seguir un modelo de gestión determinado.

- Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos en la utilización de lodos con fines agrícolas:

Establece los contenidos máximos de metales pesados en los lodos destinados a uso agrícola, prohíbe la aplicación en algunos cultivos, al tiempo que establece plazos para su aplicación en los cultivos autorizados, considera la necesidad de mantener un código de buenas prácticas agrícolas, determina la realización de analíticas de lodos y suelos y, por último, establece los métodos oficiales para la caracterización de los lodos así como para el muestreo y análisis de los suelos objeto de aplicación.

- Real Decreto 1310/1990 de 29 de octubre del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (transpone la Directiva 86/278/CEE a nuestro ordenamiento jurídico):

Establece el marco normativo que regula la gestión de lodos en el sector agrario con la finalidad de lograr un equilibrio entre la producción de estos y su utilización agraria en España, tratando de lograr una protección eficaz de los factores físicos y bióticos afectados por el proceso de producción agraria.

- Orden 26 de octubre de 1993 sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (B.O.E. n.º 265, del 5-11-1993):

Añade algunos requisitos, tales como la obligatoriedad del suministro de información de la estación depuradora al inicio de su funcionamiento y el envío por el responsable de la depuradora de una ficha semestral elaborada por la entidad que gestiona los lodos de uso agrícola de forma que permita controlar las cantidades dedicadas a fines agronómicos.

- Real Decreto 1481/2001, de vertedero (Transposición de la Directiva 99/31/CEE, relativa al vertido de residuos):

Establece limitaciones de vertido tales como el tratado previo, la reducción de materia orgánica en el vertido y la prohibición de realizar vertidos líquidos.

- Real Decreto 653/2003 (Transposición de la Directiva 2000/76/CEE regulación de la incineración de residuos peligrosos y no peligrosos):

Se establecen estrictas condiciones de incineración de residuos, en la que se incluyen fangos de depuradora, ya sea como forma de valorización o de eliminación.

1.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales se basa en la aplicación de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, al agua contaminada, con el fin de tratar y eliminar los contaminantes introducidos por el uso humano cotidiano del agua.

El tratamiento del agua residual se lleva a cabo en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), donde el agua llega a través de los colectores municipales antes nombrados.

El esquema de cualquier planta depuradora cuenta con dos líneas de tratamiento: línea de agua y línea de fango.

1.2.1. Etapas del proceso de depuración

El proceso de depuración de las aguas residuales tiene lugar con la consecución de una serie de etapas diferenciadas por el tipo de separación que realizan.

1.2.1.1. Pretratamiento

Este proceso comprende un número de operaciones unitarias, tanto físicas como mecánicas, que tienen como objetivo eliminar todas las materias sólidas de alta densidad que, por su naturaleza y tamaño, podrían interferir en el funcionamiento de los diferentes equipos de la estación depuradora.

Todas las operaciones que tienen lugar en el pretratamiento están orientadas a:

1. Eliminar de las aguas residuales los sólidos bien en suspensión o flotantes que se encuentran en las aguas a depurar.
2. Separar los sólidos inorgánicos de mayor densidad como arenas, gravas...

3. Separar las grasas o aceites que se encuentran en cantidades excesivas.

1.2.1.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como misión la separación de los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, no retenidos en el pretratamiento, mediante el proceso físico de la sedimentación. Esto se consigue reduciendo la velocidad de la corriente de agua a depurar.

Dentro del tratamiento primario se suele incluir la eliminación de grasas y aceites, aunque a veces se realiza en el pretratamiento.

1.2.1.3. Tratamiento secundario

En este proceso, la mayor parte de los compuestos orgánicos disueltos y algunos de los coloidales, que permanecen en las aguas residuales después de la sedimentación primaria, son metabolizados por microorganismos en otros más simples y estables. A la vez, una fracción de los compuestos orgánicos metabolizados es convertida en masa celular que, se separará de la corriente de agua residual por sedimentación.

Este proceso se llama biológico porque es efectuado por los microorganismos vivos presentes en las aguas, consiguiendo disminuir la materia orgánica biodegradable disuelta y muchos de los sólidos en suspensión coloidales.

Durante la degradación de la materia orgánica presente en el agua tienen lugar reacciones biológicas que se pueden resumir en dos fases: por un lado la transformación de una parte de la materia orgánica en nuevas células y por el otro, la oxidación de la materia orgánica obteniendo así, la energía necesaria para realizar las funciones vitales de los microorganismos.

Una vez asimilada la materia orgánica se procede a separar los microorganismos depurados del efluente mediante decantación. Esta biomasa recibe el nombre de fangos secundarios.

Existen dos grandes tipos de técnicas de depuración según el estado en el que se encuentre el cultivo biológico:

1. Fangos activados: consiste en provocar el desarrollo de un cultivo bacteriano en suspensión o disperso en forma de flóculos (fangos activados) en un depósito agitado y aireado alimentado con el agua que ha de depurarse.

2. Lechos bacterianos: se basa en fijar una biopelícula aerobia (cultivo bacteriano) en un medio soporte en contacto con el agua, dejando aire entre los huecos que quedan entre los soportes, de forma que se permita oxigenación de la biopelícula.

1.2.1.4. Tratamiento terciario

No todas las estaciones depuradoras incluyen el tratamiento terciario en su proceso de depuración. Este tratamiento, al que también se le denomina “tratamiento avanzado”, consiste en la realización de una serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional.

Consiste básicamente en la eliminación de la mayor parte de los microorganismos patógenos presentes en el agua mediante oxidantes como el cloro, ozono...etc.

1.2.2. EDAR de Gandía y zona sur de la Safor

La Estación Depuradora de Aguas Residuales de Gandía y zona Sur de la Safor pertenece al Plan de Saneamiento de la Comunidad Valenciana formando parte de la actuación en materia de saneamiento de la comarca de la Safor.

La depuradora tiene el fin de conseguir la mayor calidad de las aguas residuales y una mínima repercusión en el medio ambiente en las dos zonas de mayor sensibilidad de la Safor como son la desembocadura del río Serpis y el entorno marítimo, así como las playas de Daimuz, Guardamar, Miramar, Piles y Gandía.

Se estima que el caudal máximo a tratar en la EDAR durante el periodo invernal es de 40.000 m³/día, cifra que se ve incrementada durante el periodo estival, debido al aumento de población en las zonas de costa, a un caudal máximo de 60.000 m³/día.

A continuación se presentan algunos datos generales de la eficacia del proceso de depuración que se da en la EDAR Gandía y Sur de la Safor:

- DBO entrada:.....280 mg/l
- DBO salida:.....< 25 mg/l
- Sólidos en suspensión entrada:.....270 mg/l

- Sólidos en suspensión salida:.....< 35 mg/l
- DQO salida.....< 125 mg/l
- Sequedad del fango:.....> 25 %

El agua a tratar llega a la depuradora a través de una serie de colectores que captan el agua residual procedente de diferentes municipios de la Safor:

- Colector de Gandía ciudad: llega a la EDAR desde la rotonda de Daimuz, que atraviesa el lecho del río Sèrpis e incorpora también Benirredrà.
- Colector del Grau de Gandía y la playa: llega desde la playa y Grao de Gandia a través del lecho del río Sèrpis.
- Colector general sur: se extiende y recoge las aguas residuales desde la Fuente de Carrós, por el barranco del Beniteixir y desde Piles, paralela a la línea del mar, hasta Marenys de Rafalcaid, recogiendo los núcleos urbanos de la Fuente d'En Carrós, Rafaelcofer, l'Alqueria de la Comtessa, Palmera y Bellreguard, así como Piles, Miramar, Guardamar y Daimuz, y sus núcleos de la playa.
- Colector de Beniarjó: incorpora a la depuradora las aguas residuales de Villalonga, Potrías, Beniflá, Almoines y Beniarjó.

La figura 1.1 muestra el diagrama general, tanto de la línea de aguas como la de fango, la Estación Depuradora de Gandía y zona sur de la Safor.

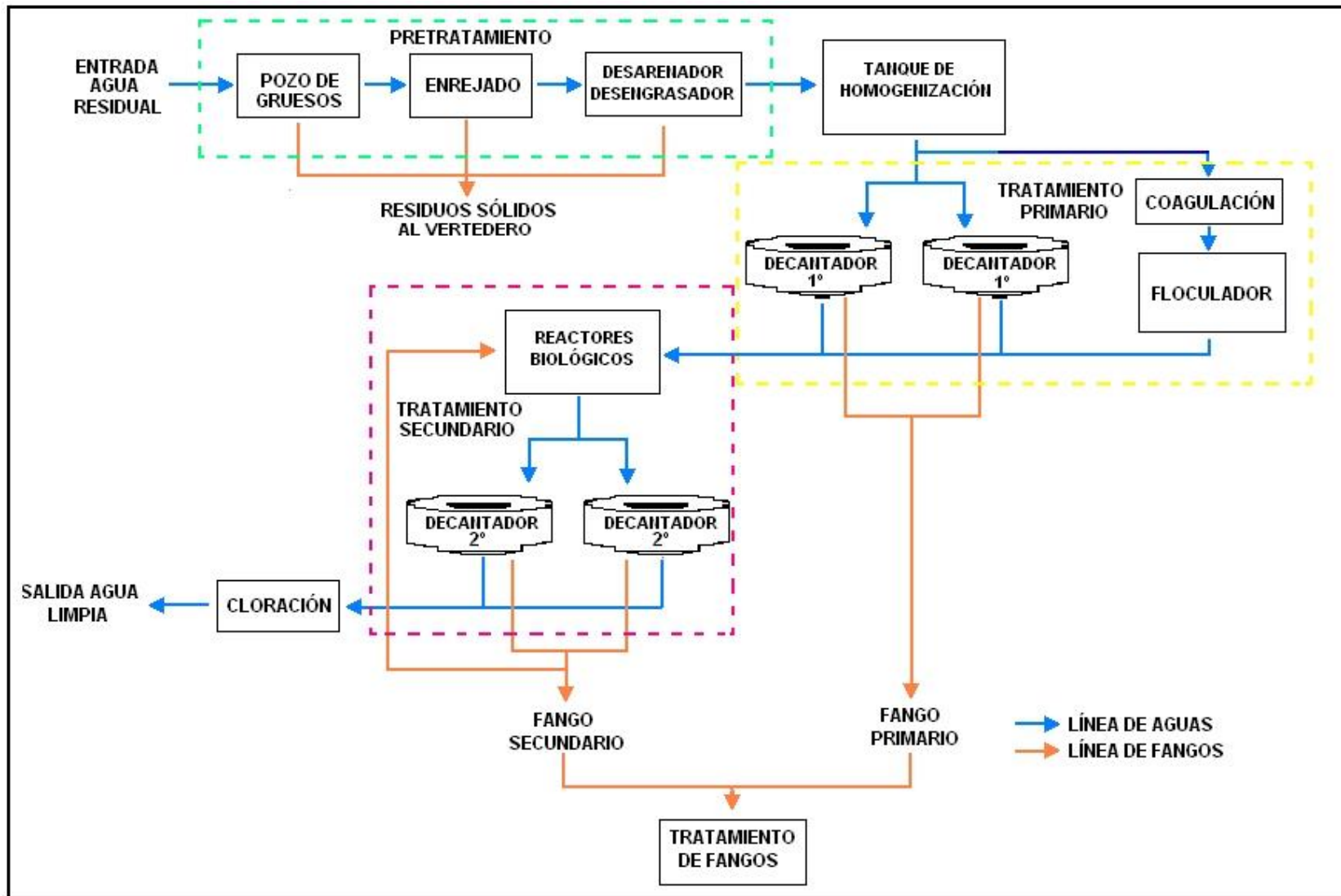


Figura 1.1.- Diagrama general de la EDAR de Gandia y zona sur de la Safor

- Línea de aguas:

La línea de aguas comienza con la llegada del agua bruta a un pozo donde se reúnen todos los colectores. La eliminación de los sólidos de mayor tamaño del agua residual se inicia en la arqueta de gruesos a través de una grúa pluma con una cuchara bivalva y una reja de predesbaste de 100 mm de paso.

A continuación, el efluente es impulsado a través de 6 bombas del tipo hélice a la zona de desbaste, donde atraviesa dos rejillas automáticas con un paso de 50 mm, así como tres tamices automáticos que eliminan los sólidos de más de 3 mm. Los residuos sólidos obtenidos tanto en las rejillas como en los tamices son recogidos y almacenados en contenedores para su posterior traslado al vertedero.

Una vez el agua se ha desprendido de los sólidos gruesos, es dirigida a través de unos conductos al desarenador-desengrasador donde son eliminadas tanto las grasas como las arenas más pesadas.

Posteriormente, el efluente es almacenado en una balsa de homogenización de 7.500 m³ de capacidad, con el objetivo de conseguir un caudal de entrada uniforme y una carga contaminante homogénea. Por ello, esta balsa está dotada de agitadores y difusores a lo largo de toda su base, asegurando una mezcla completa del efluente.

El tratamiento primario se lleva a cabo en dos decantadores de 30 m de diámetro, en los cuales por medio de unas rasquetas situadas al fondo, se extraen los lodos depositados en la base y, a través de otras superficiales, se acumulan las espumas para ser dirigidas a un posterior tratamiento específico.

Debido a la variación de caudal a tratar a lo largo de las diferentes épocas del año, la planta está dotada de dos tratamientos en la línea de aguas: un tratamiento biológico para un caudal de 40.000 m³/día y un tratamiento fisicoquímico diseñado para un caudal de 20.000 m³/día puesto en funcionamiento solo durante el periodo punta estacional.

El tratamiento biológico consiste en hacer circular el agua por dos reactores biológicos en cuyo interior se mantiene por medio de soplantes que inyectan aire, una masa activa de microorganismos depuradores aerobios capaces de eliminar los nutrientes que contiene el agua.

El tratamiento fisicoquímico de la línea de punta estacional consiste en la aceleración del proceso de decantación mediante el uso de reactivos. Para ello, se dispone en la planta de un decantador lamelar floculador con recirculación de fangos denominado Densadeg.

Tras tratar biológicamente el efluente, se hace circular el agua a través de dos decantadores secundarios de 40 m de diámetro, que absorben por succión las partículas del fango a través de unos tubos colocados a diferentes alturas. La mayor parte de los fangos obtenidos en la decantación secundaria son recirculados de nuevo a los reactores aerobios como aportación nutricional con el fin de asegurar el mantenimiento de las bacterias aerobias.

Una vez clarificada el agua por los procesos de decantación, se circula al tratamiento avanzado de cloración y desde allí, se canaliza por el margen izquierdo del río Sèrpis hacia la actual arqueta donde se vierten los caudales depurados al emisario submarino. Cuando éste alcanza su máxima capacidad, el exceso de aguas depuradas rebosa al cauce del río Sèrpis.

- Línea de fangos:

En función de la procedencia de los fangos, éstos van a tener unas características diferentes y por ello deben ser sometidos a tratamientos diferentes. Como consecuencia, los fangos obtenidos en los decantadores primarios son extraídos hacia el espesador donde reducirán su volumen en humedad; los obtenidos en el tratamiento fisicoquímico no se espesan debido a su densidad de salida, próxima a los 45 g/l; y, por último, los fangos obtenidos en la decantación secundaria y que no son recirculados, son presurizados e introducidos en el depósito de flotación, con el fin de conseguir una concentración media de 40 g/l.

Tanto los fangos obtenidos por el flotador, el espesador y los del tratamiento fisicoquímico son mezclados y dirigidos al digestor anaerobio donde estarán durante 22 días a una temperatura de 35 °C, con el fin de reducir el contenido en materia orgánica.

Una vez el fango ha pasado el proceso de digestión, es almacenado en un depósito desde el cual se bombea el fango dosificadamente hacia las centrifugas de deshidratación.

Por último, el residuo seco obtenido tras la deshidratación, es almacenado en tolvas a la espera de ser recogido y transportado al lugar de vertido apropiado o ser destinado a la formación de compost.

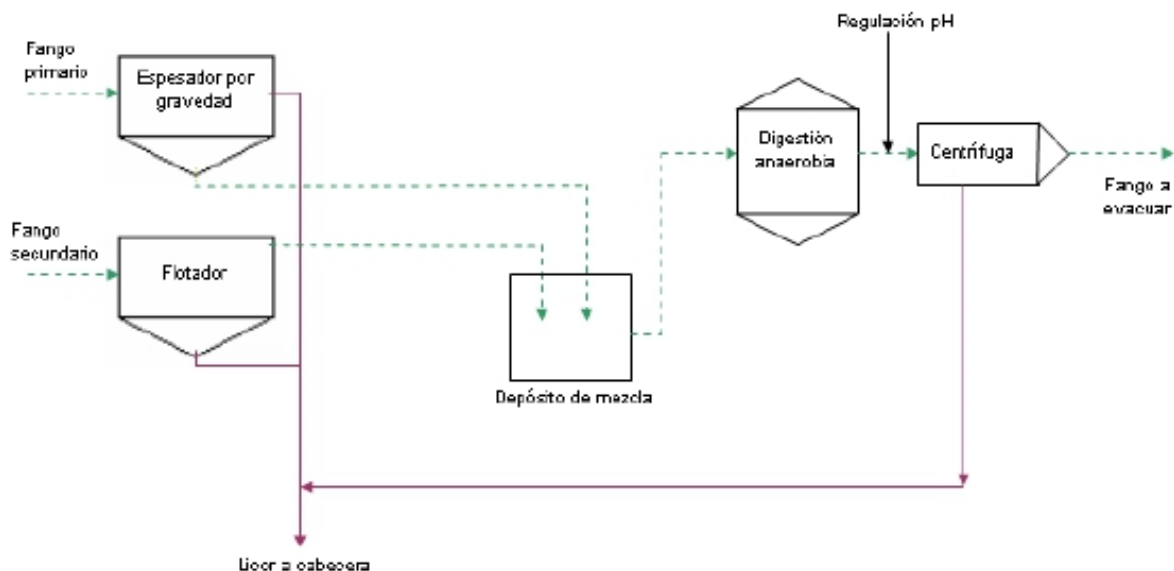


Figura 1.2.- Diagrama general de la línea de fango de una EDAR

- Línea de gas:

Durante el proceso de digestión que sufren los fangos, tiene lugar una reacción metanogénica que transforma la biomasa en compuestos más simples como el metano y dióxido de carbono. Estos gases son utilizados en la planta por un lado para calentar los fangos y mantenerlos a la temperatura de 35 °C durante el proceso de digestión, y por el otro, son inyectados a través de unas cañas al digestor de fangos con el fin de asegurar la agitación de estos.

El gas sobrante es introducido en el gasómetro y en el caso en el que reproduzca un exceso de gas, será eliminado mediante su combustión en la antorcha.

1.3. Fangos de depuración

El tratamiento de las aguas residuales ha resultado ser una práctica cada vez más generalizada y fundamental para la salvaguarda del medio ambiente. Los procesos de tratamiento son cada día más eficaces y capaces de eliminar una mayor carga de contaminantes con la consecuencia directa de producir una mayor cantidad de fangos. Si a esto unimos la necesidad legal de cumplir con la normativa europea en materia de tratamiento de aguas residuales urbanas recogida en la directiva 91/271/CEE (Consejo CE, 1991), transpuesta a la legislación española (RD 11/1995 y RD509/1996), se aprecia en un horizonte cercano un importante aumento en la cantidad de fangos generados.

Los constituyentes del agua residual eliminados en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arena, espumas y fango. De todos estos, el fango es, con diferencia, el de mayor volumen y contenido contaminante, constituyendo su tratamiento y evacuación uno de los problemas más complejos.

El fango producido en las operaciones de tratamiento de las aguas residuales suele ser un líquido o líquido semisólido cuyas características dependen del origen de las aguas residuales, el proceso de tratamiento de las mismas, la época del año y el proceso de tratamiento al que los fangos sean sometidos.

1.3.1. Producción de fangos

A lo largo del proceso de depuración, las aguas se han visto desprovistas de los sólidos en suspensión a través de las sucesivas etapas del proceso comentadas en apartados anteriores.

Los fangos de depuración se producen por sedimentación de los sólidos en los decantadores de los distintos procesos de tratamiento. Por un lado, las partículas sólidas más gruesas se depositan en

el fondo del decantador primario y forman los fagos primarios. Las partículas más finas y disueltas se fijan y metabolizan por las bacterias que se multiplican en presencia de oxígeno durante la operación de aireación. Esta biomasa bacteriana se separa en el decantador secundario para producir los fagos secundarios. Una parte de esta biomasa se recircula al depósito de aireación, la otra se extrae constituyendo los fagos biológicos en exceso. A su vez, ambos tipos de fagos se pueden mezclar formando los fagos mixtos.

En definitiva, la producción de fagos resulta de la acumulación consecutiva de tres fenómenos combinados que se dan en el proceso de depuración:

1. La producción de microorganismos.
2. La acumulación de materias en suspensión minerales.
3. La acumulación de materias orgánicas no biodegradables en las condiciones de trabajo.

El origen de los sólidos producidos en las plantas de tratamiento varía en función del tipo de esta y del modo de explotación. Las principales fuentes de sólidos y fagos en una instalación convencional son los siguientes:

1. Desbaste Sólidos gruesos.
2. Desarenado Arenas y espumas.
3. Preaireación Arenas y espumas.
4. Decantación primaria Fango primario y espumas.
5. Tanques de aireación Sólidos suspendidos.
6. Sedimentación secundaria Fango secundario y espumas.
7. Instalaciones de tratamientos de fagos, compostaj y cenizas.

Lamentablemente, en el día de hoy se dispone de pocas estadísticas o datos cuantificados sobre la generación de fagos de depuración en nuestro país. Los mejores datos de los que se dispone son los que figuran en el Registro correspondiente del MAPA (Registro Nacional de Lodos de Depuradora).

La figura 1.3 resume la evolución ascendente en el periodo 1997-2005 de la generación de fangos de depuradora en España.

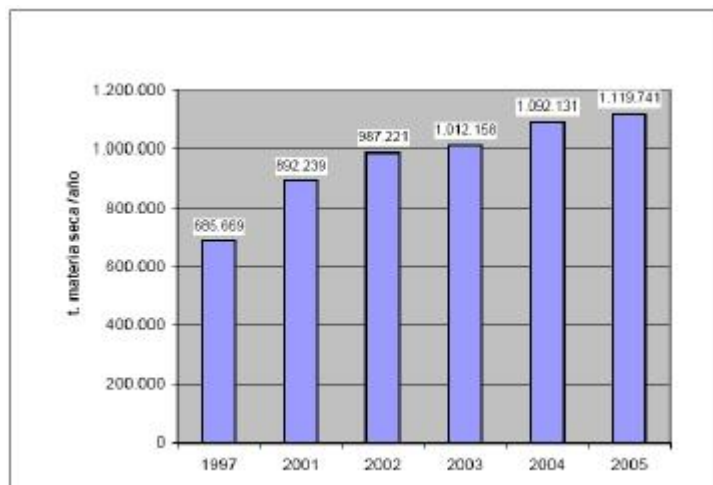


Figura 1.3.: Generación de fangos en España, periodo de 1997 a 2005.

La tabla 1.1 refleja los datos estimados acerca del volumen de fangos producidos por algunas Comunidades Autónomas y las previsiones estimadas para el año 2005, según el Plan Nacional de Lodos (2001-2006).

Tabla 1.1.- Producción de fangos por Comunidades Autónomas, periodo de 1998 a 2005.

COMUNIDADES AUTÓNOMAS	LODOS PRODUCIDOS EN 1998 (t materia seca/año)	LODOS PRODUCIDOS PARA 2005 (t materia seca/año)
Andalucía	-	312.500
Aragón	-	41.000
Asturias	-	36.000
Canarias	-	54.000
Cantabria	-	18.000
Castilla La Mancha	-	81.000
Castilla y León	23.906	56.000
Cataluña	244.805	200.000
Ceuta	-	1.200
Comunidad Valenciana	-	130.000
Extremadura	-	36.000
Galicia	-	90.000
Illes Balears	29.639	29.000
La Rioja	-	8.000
Madrid	162.278	178.000-342.862
Melilla	1.095	1.100
Murcia	32.740	37.000
Navarra	6.227	11.314
País Vasco	21.848	63.000
Toneladas materia seca totales España	800.000	1.547.976

Teniendo en cuenta la población de cada Comunidad Autónoma, puede estimarse que en España se generaron en 1998 alrededor de 800.000 toneladas de fangos, expresados en materia seca. Esta cifra es superior a la que figura en el Registro Nacional de Lodos de EDAR, que elabora el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, según el cual en 1998 se habrían generado en España 689.488 toneladas de materia seca.

Según datos del Registro Nacional de Lodos del MAPA la producción de lodos se ha incrementado en un 39% (1997-2005). Las CCAA que más lodos producen son Cataluña, Madrid y la Comunidad Valenciana.

1.3.2. Origen y características de los fangos de depuradora

El fango está principalmente formado por las sustancias de carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas; la fracción del fango a evacuar está compuesta por la materia orgánica presente sujeta a procesos de descomposición, y sólo una pequeña parte del fango está compuesta por materia inorgánica.

Tipos de fango:

➤ Fangos primarios

Los fangos primarios son los procedentes de los decantadores primarios. Se trata principalmente de sólidos suspendidos que no han sido sometidos a ningún tratamiento biológico y que, por consiguiente, son altamente inestables y putrescibles. Su color es gris, con altos contenidos en sólidos fecales y otros tipos de desechos. Liberan fácilmente el agua que contienen y se espesan bien. Su contenido en humedad varía entre el 95-99% (WIKILIBROS).

En estos fangos hay que incluir las espumas y grasas que se recogen en la superficie de los decantadores primarios.

➤ Fangos del proceso físico-químico

Son fangos procedentes del tratamiento físico-químico. Debido a que se han ido formando gracias a la acción de compuestos químicos, estos fangos contienen sales metálicas, que le proporcionan un color oscuro. En ocasiones adquieren una tonalidad rojiza como consecuencia de la presencia de hierro.

Es algo grasiento, ya que los hidratos de hierro o aluminio lo hacen muy gelatinoso. Si se deja mucho tiempo en el tanque se produce su descomposición. Durante la cual, se produce gas en grandes cantidades y su densidad va aumentando.

➤ Fangos activados

Como su nombre indica, proceden del proceso de fangos activados. Se corresponden con el fango en exceso producido en los decantadores secundarios. Su materia orgánica está parcialmente descompuesta gracias a la acción de los microorganismos.

Tiene una apariencia floculenta de color marrón. Si el color es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico. En cambio, si el color es más claro de lo normal puede haberse aireado insuficientemente y los sólidos tienen tendencia a sedimentar lentamente. En buenas condiciones tiene un olor a tierra húmeda poco desagradable, pero tiende a convertirse en séptico con rapidez, adquiriendo un olor muy desagradable.

Las características del fango son variables y dependen básicamente del origen de los sólidos que lo constituyen, del tiempo transcurrido desde su producción y del tipo de proceso al que hayan sido sometidos. En general, las principales características que comparten los fangos independientemente del proceso de depuración del que proceden son:

- Sequedad: 20-30%
- Materia orgánica: 60-80%
- Materia inerte: 40-20%
- Nitrógeno: 3-5%
- Escaso contenido en macronutrientes (P y K)
- Posible presencia de metales pesados
- Presencia de microorganismos patógenos: bacterias, parásitos intestinales y virus.

En la tabla 2 se resumen las características en cuanto a composición de los fangos derivados del tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tabla 1.2.- Composición de fangos procedentes de la depuración.

	Fangos primarios	Fangos secundarios (Fangos activos)	Fangos digeridos
S.S (g/hab.dia)	30-36	18-29	31-40
Contenido en agua (%)	92-96	97,5-98	94-97
S.S.V (% S.S)	70-80	80-90	55-65
Grasas (% S.S)	12-16	3-5	4-12
Proteínas (% S.S)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (% S.S)	8-10	6-8	5-8
Ph	5,5-6,5	6,5-7,5	6,8-7,6
Fósforo (P) (% S.S)	0,5-1,5	1,5-2,5	0,5-1,5
Nitrógeno (N) (% S.S)	2-5	1-6	3-9
Bacterias patógenas (Nº por 100 ml)	3 5 10 -10	100-1000	10-100
Organismos parásitos (Nº por 100 ml)	8-12	1-3	1-3
Metales pesados (Zn, Pb, Cu) (% S.S)	0,2-2	0,2-2	0,2-2
Cantidad de fango (l/hab.dia)	0,70	1,70	0,90

Una característica muy importante de los lodos es la fuerza con la que el agua está ligada a la materia seca que contienen. Una parte del agua se presenta como agua libre, pero la mayor cantidad del agua adicional se encuentra ligada a los elementos coloides y a los compuestos químicos o minerales.

Por otro lado, los metales pesados se encuentran distribuidos por el fango entre las fases minerales insolubles y las fases celulares o intracelulares orgánicas. La afinidad de los metales pesados con cada una de estas fases sólidas depende del método de tratamiento del fango y la movilidad de estos, estrechamente ligada al tratamiento de estabilización del mismo.

1.3.3. Tratamiento de fangos en depuradoras

El objetivo básico del tratamiento del fango es el de reducir el contenido orgánico y la fracción líquida presente en el fango procedente tanto del tratamiento primario como secundario.

Los problemas que se presentan al tratar el fango son un tanto complejos debido a que:

- El fango está constituido por sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales.
- El fango a eliminar procedente del tratamiento biológico, está compuesto de materia orgánica que también se descompondrá y se volverá desagradable.
- El contenido en materia sólida del fango es muy bajo.

El tratamiento de los fangos depende de su composición y del tipo de agua residual del que proviene. Las fases más usuales en un proceso de tratamiento de fangos son: espesamiento, estabilización y deshidratación.

Entre los métodos de procesado del fango que se van a describir a continuación, el espesamiento y la deshidratación se utilizan fundamentalmente, para eliminar la humedad del fango y la estabilización se utiliza principalmente para eliminar la materia orgánica presente.

➤ **Espesamiento:**

El espesado es un procedimiento utilizado para incrementar el contenido de sólidos de fango por eliminación por parte de la fracción líquida. El objetivo fundamental del espesamiento es la reducción del contenido en agua a fin de minimizar el volumen final a gestionar.

El espesado se consigue generalmente por medios físicos, incluyendo sedimentación, flotación y centrifugación.

1. Espesado por gravedad:

Este se consigue en un tanque, normalmente circular, de diseño similar al de un decantador convencional. El fango diluido se conduce en el tanque por una campana deflectora central y se remansa para que sedimente. El fango ya sedimentado se concentra y recoge en la parte central del centro cónico mediante rasquetas rotatorias, y una vez allí, se extrae para su posterior tratamiento o evacuación.

La concentración de fangos por gravedad es muy utilizada con fangos primarios superiores al 6-7 % de materia seca.

2. Espesado por flotación:

Este sistema es muy eficiente al ser independiente de la sedimentabilidad, por ello se aplica a los fangos secundarios de fangos activados cuyo espesamiento es complicado.

El principio más utilizado por la flotación es el de aeroflotación, por inyección de agua presurizada que previamente se ha recirculado desde el tanque de flotación. Con ello, se pretende disminuir artificialmente la densidad de los fangos debido a la fijación por capilaridad de las microburbujas generadas sobre los flocs. Estas microburbujas de aire se producen por la despresurización del agua saturada de aire. Al igual que el espesamiento por gravedad, el fango a concentrar se conduce, en este caso junto con el agua de salida del concentrador presurizada, hacia una campana tranquilizadora central, pero a diferencia de aquél, los fangos concentrados se extraen por decantación superficial.

3. Espesado por centrifugación:

Este método supone la sedimentación de las partículas del fango bajo la influencia de fuerzas centrífugas. Se utiliza tanto para la deshidratación del fango como para espesar, quedando su aplicación en el espesado limitada al fango activado en exceso.

➤ **Estabilización:**

Los fangos de depuración constituyen una concentración de la contaminación de las aguas tratadas y en consecuencia contienen microorganismos, materia viva, y elementos orgánicos dando lugar a fermentaciones con los derivados problemas de los mismos.

La estabilización se realiza tanto en los fangos procedentes del tratamiento primario como secundario con el objetivo de:

1. Reducir patógenos.
2. Eliminar olores desagradables.
3. Inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción.

La consecución de estos objetivos depende básicamente de los efectos que ocasione el proceso de estabilización sobre la fracción volátil u orgánica del fango, ya que, los microorganismos se desarrollan sobre ésta.

Los procesos más empleados para la estabilización de del fango son la estabilización con cal, digestión aerobia y digestión anaerobia. La selección de un determinado proceso de estabilización depende fundamentalmente del destino final de los lodos.

1. Estabilización con cal:

Consiste en elevar el pH del fango crudo mediante la adición directa de cal, hasta lograr un medio básico de pH 12 o mayor, inadecuado para la supervivencia de los microorganismos. En consecuencia, el fango no sufrirá putrefacción ni desprenderá olores ni constituirá un peligro sanitario.

La estabilización con cal no supone una destrucción de la materia orgánica necesaria para el crecimiento bacteriano, por ello, debe mantenerse en un pH básico si no se quiere activar la reproducción bacteriana y comenzar de nuevo la putrefacción.

Dentro de las tecnologías tradicionalmente disponibles, la estabilización con cal, es un proceso que tiene importantes inconvenientes, como es el aumento del volumen del fango, el consumo de reactivos y la ocupación de mayor superficie. Estos problemas hacen que su utilización tenga carácter marginal y que su tecnología esté, por tanto, limitada a pequeñas plantas.

2. Digestión aerobia:

La digestión aerobia es otro de los métodos de estabilización de fangos destinado a la eliminación de la parte fermentable de estos. En este proceso se pretende:

- La disminución de las materias volátiles
- La mineralización de la materia orgánica
- La concentración de fangos

Los fangos sometidos a una aireación prolongada y trabajando en la zona denominada de respiración endógena, disminuyen de forma continua por la acción de los microorganismos existentes en el reactor biológico, a la vez que se produce una mineralización de la materia orgánica. Los productos finales de este proceso metabólico son anhídrido carbónico, agua y productos solubles inorgánicos.

Los microorganismos, que van a actuar en el proceso de estabilización, son los mismos que han sido extraídos del proceso de depuración en sus distintas etapas.

Durante la fase endógena es necesario aportar oxígeno del exterior, para que las condiciones aerobias se mantengan en el reactor. Las necesidades de oxígeno en el tiempo de estancia en

digestión, y las características del fango resultante y sobrenadante, son las variables principales del proceso, en el que la temperatura juega un papel muy importante.

Los fangos estabilizados pueden contener una cantidad importante de elementos volátiles, como celulosa, carbonatos... ya que, realmente son bastante estables y su tiempo de fermentación es muy superior al del tiempo de retención en el reactor biológico.

3. Digestión anaerobia:

La digestión anaerobia es uno de los procesos más extendidos y utilizados en la estabilización de fangos. En este proceso se produce la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular.

La materia orgánica contenida en la mezcla de fangos primarios y biológicos se convierte biológicamente, bajo condiciones anaerobias, en metano y dióxido de carbono. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado en el que los fangos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen en su interior durante periodos de tiempo variables. El fango estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido en materia orgánica y patógena, y no es putrescible.

La conversión biológica de la materia orgánica de los fangos tiene lugar en tres etapas:

1. Hidrólisis: comporta la transformación de los compuestos de alto peso molecular en compuestos que puedan servir como fuentes de energía y de carbono celular.
2. Acidogénesis: implica la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular.
3. Metanogénesis: supone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono. La reacción general podría resumirse como:



Esta conversión se lleva a cabo mediante la acción conjunta de diferentes organismos anaerobios. Existen 4 grupos o categorías de bacterias que participan de forma sinérgica en las diferentes etapas de la conversión de materia hasta moléculas sencillas:

1. Bacterias hidrolíticas. (Clostridium, Proteus, Bacteroides, Bacillus, Vibrio, Acetovibrio, Staphylococcus). Rompen los enlaces complejos de las proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros o moléculas como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol. Estos monómeros pasarán al siguiente grupo de bacterias.

2. Bacterias fermentativas acidogénicas. (Clostridium, Lactobacillus, Escherichia, Bacillus, Pseudomonas, Desulfovibrio, Sarcina). Convierten azúcares, aminoácidos y lípidos en ácidos orgánicos, alcoholes y cetonas, acetato, CO₂ y H₂.

3. Bacterias acetogénicas. Son bacterias que solo se desarrollan como productoras de H₂ junto a otras bacterias consumidoras de esta molécula. Syntrophobacter wolinii, y Syntrophomonas wolfei convierten el propiónico, butírico y algunos alcoholes en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, el cual se utiliza en la metanogénesis.

4. Metanógenas: Existen tanto bacterias Gram positivas como negativas. Estos microorganismos crecen muy despacio, con tiempo de generación que van desde los 3 días a 35 °C hasta los 50 días a 10 °C.

Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que estabilice correctamente el residuo orgánico, los microorganismos formadores de ácidos y de metano se deben encontrar en un estado de equilibrio dinámico.

El contenido del reactor deberá carecer de oxígeno disuelto y estar libre de concentraciones inhibitorias de constituyentes tal como los metales pesados y los sulfuros. El medio acuoso deberá tener valores de pH entre 6,6 y 7,6. Y alcalinidad suficiente para que el pH no descienda de 6,2. Se ha de disponer de suficiente cantidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Y los intervalos de temperatura óptimos son el mesofílico (30 a 38 °C) y el termofílico (49 a 57 °C), (Metcalf & Eddy, 1995).

Este sistema presenta una serie de ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Importante reducción de sólidos volátiles (entre un 40 y un 60%).
- Bajos costes de operación si se recupera el metano producido.
- Proceso excedentario en energía.
- Es el método más rentable económicamente para plantas que traten por encima de 7.500 m³/día y se puede aplicar a plantas cuyo intervalo de tamaños abarca más de dos órdenes de magnitud.
- Buena reducción del número de microorganismos patógenos.
- Lodos utilizables para agricultura, pudiendo aplicarse generalmente en mayor cantidad que los correspondientes biosólidos obtenidos mediante digestión aerobia.
- Reducción de la masa total de lodo.

Inconvenientes:

- Elevado volumen de inversión preciso para llevar a cabo su instalación.
- Posibilidad de depósitos minerales en el equipo, dificultades de limpieza y posible formación de espumas.
- Potencial producción de olores.
- Peligrosidad de los gases inflamables producidos.
- Presenta sobrenadantes con elevadas DBO, DQO, sólidos en suspensión y N-NH₃.
- Puede presentar problemas de "digestión acida" ya que los microorganismos productores de metano son de crecimiento lento.

➤ **Deshidratación**

La deshidratación es la operación física utilizada para reducir el contenido en humedad del fango por alguna o varias de las siguientes razones:

- La disminución del volumen del fango tras el proceso de deshidratación abarata los costes de transporte al lugar de su evacuación.
- El fango deshidratado es más fácil de manipular que el fango espesado o líquido.
- La deshidratación es necesaria antes de la incineración del fango para incrementar su poder calorífico por eliminación del exceso de humedad.
- En algunos casos, es necesaria la eliminación del exceso de humedad para lograr que el fango sea totalmente inodoro y no putrescible.
- La deshidratación del fango es precisa antes de su evacuación a vertederos para eliminar la formación de lixiviados en la zona del vertedero.

Los dispositivos de deshidratación utilizan varias técnicas para la eliminación de la humedad. Algunos dependen de la evaporación y filtración naturales mientras que los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos para deshidratar el fango más rápidamente. Entre los procesos de deshidratación disponibles se encuentran las centrifugas, los filtros prensa, filtros banda y las eras de secado.

1. Centrífugas:

El proceso de centrifugación se basa en la acción centrípeta para la separación sólido-líquido por diferencia de densidades. Consiste en una unidad giratoria, llamada tambor, en cuyo interior y en el mismo sentido se hace girar un tornillo, a velocidad ligeramente diferente, que empuja el fango cada vez más seco hacia el extremo cónico de la centrífuga mientras el agua, menos densa, se escurre y recoge en el mismo sentido o sentido contrario.

A fin de cohesionar y aumentar el tamaño de los flóculos del fango a deshidratar, se adiciona en el proceso de centrifugación un polielectrolito. En estas condiciones se obtienen sequedades del 20-25 % de materia seca para fangos mixtos (primarios y secundarios). En general, se obtienen mejores sequedades a medida que se incrementa la proporción de fangos primarios y disminuye la de fangos biológicos. La centrífuga al ser un equipo totalmente cerrado permite un mejor control de los olores que suelen desprender los fangos durante su manejo.

2. Filtro prensa:

En un filtro prensa, la deshidratación se realiza forzando la evacuación del agua presente en el fango por aplicación de una presión elevada. Las ventajas que presenta este proceso de deshidratación son:

- Obtención de altas concentraciones de sólidos en la torta.
- Obtención de un líquido filtrado muy clarificado.
- Elevada captura de sólidos.
- Bajo consumo de productos químicos.

Consiste en un conjunto de placas perfectamente alineadas y entre ellas se dispone de membranas filtrantes de forma que al ejercer una presión suficientemente elevada se consigue separar el agua que se filtra por los poros de la membrana, quedando el fango retenido.

Este sistema a diferencia de los otros, trabaja en discontinuo, necesita la presencia de mano de obra especialmente en la descarga. La sequedad final, con la adición de algún reactivo químico acostumbra a estar sobre 40-45% de materia seca o superior si se trata de fango primario.

3. Filtro banda:

Este sistema se basa al igual que el filtro prensa en la presión y filtración mecánica. Consta de dos tamices o cintas de tela filtrante sinfín que convergen entre sí en forma de cuña, y son conducidos por rodillos mientras presionan mutuamente.

El lodo se mezcla con el floculante y se condiciona en un tambor mezclador que gira con regulación continua de velocidad. En la prensa el proceso de extracción de agua del lodo se realiza en tres zonas: de filtraje, cuneiforme y de presión.

La prensa está concebida para obtener concentraciones de salida óptimas entre 25-45 % de materia totalmente seca. Con este método pueden tratarse fangos primarios y biológicos, digeridos y sin digerir.

4. Eras de secado:

Las eras de secado es el sistema de deshidratación de fangos más antiguo. El método consiste en incorporar los lodos sobre una balsa de arena, con fondo drenado, de forma que el fango queda deshidratado por un lado debido al drenaje a través de la masa del mismo y de la arena de soporte, y por el otro con la evaporación de la superficie expuesta al aire.

El fango que se extrae de las eras de secado después de que haya drenado y secado durante el tiempo suficiente, posee una textura basta, agrietado y es de color negro o marrón oscuro. El contenido en humedad es aproximadamente del 60% después de 10-15 días en condiciones favorables.

1.4. Problemática de la generación de fangos

1.4.1. Tendencias y aspectos problemáticos de la producción de fangos

Durante los últimos años, las normativas, cada vez más exigentes, respecto al tratamiento de las aguas residuales impulsadas por la creciente preocupación por el medio ambiente han originado un aumento en el número de depuradoras instaladas en el territorio español. Como consecuencia directa, se ha generado un incremento importante en la producción de fangos procedentes de las estaciones de tratamiento.

La producción de lodos en las estaciones depuradoras de aguas residuales, siempre ha sido un tema conflictivo. El hecho de eliminarlos, transformarlos o depositarlos en algún lugar ha resultado ser un problema de más o menos dimensión, dependiendo de la zona en donde nos encontremos.

Existen diferentes motivos que hacen necesaria la búsqueda de métodos de tratamiento, evacuación y reutilización más eficaces:

- Salud pública: como se ha comentado en apartados anteriores, los fangos procedentes de las depuradoras contienen elevado número de patógenos que pueden producir enfermedades en las

personas u operarios que entren en contacto con él. Además, el contenido en metales pesados que presentan los lodos es objeto de atención debido a los problemas que pudieran presentar por introducción en la cadena trófica y de esta manera afectar al hombre.

- Opinión pública: los fangos de depuradora contienen compuestos productores de malos olores como sulfurados y amoníaco, como consecuencia, el olor que emiten representan un problema de aceptación por parte de la población. Por otro lado, otro aspecto importante que favorece el rechazo por parte de la opinión pública está relacionado con la desagradable apariencia externa del lodo.

- Aspectos legales: en lo referente a la disposición y utilización de los lodos, las diferentes legislaciones implementan mecanismos de control, tratamiento, y aplicación de los fangos como consecuencia del desarrollo técnico-científico y de la creciente preocupación social en lo referente a temas medioambientales.

- Aspectos medioambientales: la problemática ambiental reside en conseguir un destino final de los fangos que no produzca consecuencias adversas en el medio ambiente o que, incluso, pueda contribuir de manera positiva a la preservación y/o recuperación del mismo.

- Consideraciones económicas: se trata de disminuir los costes asociados al tratamiento, utilización, evacuación y/o eliminación de los fangos de depuradora, que suponen un porcentaje importante del coste de depuración de las aguas.

- Incremento de la producción de fangos: como resultado de la construcción de mayor número de plantas dotadas de mejores tratamientos junto con la aplicación de normativas más exigentes. El problema se encuentra en la búsqueda a una solución real y con futuro para el destino final de estos fangos, con el mínimo impacto ambiental y que permita a su vez la valorización de las materias que contienen.

Los problemas que plantean los lodos de depuradora, dependen en gran medida de su composición química y, en especial, de la concentración de metales pesados. La presencia de determinadas sustancias por encima de ciertos límites puede hacer que el lodo no sea adecuado para ciertos usos o que se tengan que adoptar precauciones especiales en su procesado posterior.

1.4.2. Usos y eliminación del fango de E.D.A.R

Los métodos de utilización y eliminación de los fangos son variados y dependen en gran medida de los condicionantes particulares de la planta de tratamiento de agua de la que proceden y de las características del fango residual.

En España, el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006 recoge datos cuantitativos sobre los usos posibles de los lodos de depuradora. Tres son los principales

destinos finales de los fangos de depuradora, tal y como informa el Registro Nacional de Lodos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca 2003:

- Aplicación a la agricultura (66,2%)
- Depósito en el vertedero (16%)
- Incineración (7,6%)

La tabla 1.3. recoge las cantidades de fangos producidos en el año 2003 en las diferentes Comunidades Autónomas de España, así como su destino de acuerdo con el Registro Nacional de Lodos.

Tabla 1.3.- Producción de lodos en España, por CCAA y destinos.

CC.AA.	Informe de síntesis año 2003				
	Total lodo	Total agrario	Total vertedero	Total incineración	Total otros
Andalucía	63.594,24	53.830,30	9.347,94	0,00	416,00
Aragón	30.576,50	8.318,50	1.943,00	20.000,00	315,00
Comunidad Foral de Navarra	14.003,50	13.956,50	40,00	0,00	7,00
Canarias	10.856,25	20,00	9.264,32	0,00	1.571,93
Cantabria	12.472,34	0,00	12.472,34	0,00	0,00
Castilla-La Mancha	2.350,00	2.350,00	0,00	0,00	0,00
Castilla y León	53.926,33	29.578,58	16.700,85	0,00	7.646,90
Cataluña	306.675,63	160.559,54	58.519,16	0,00	87.596,93
CC.AA. Ceuta y Melilla	1.460,00	0,00	1.460,00	0,00	0,00
Comunidad de Madrid	144.115,06	138.728,80	5.346,53	0,00	39,73
Comunidad Valenciana	249.259,65	180.508,83	24.191,06	42.829,06	1.730,70
Extremadura	9.430,00	6.114,00	3.316,00	0,00	0,00
Galicia	34.211,34	25.203,49	4.924,80	440,00	3.643,04
Islas Baleares	34.619,00	31.002,00	3.617,00	0,00	0,00
La Rioja	15.256,80	15.246,90	0,00	0,00	9,90
Principado de Asturias	2.229,00	1.413,00	791,00	0,00	25,00
País Vasco	24.390,99	1.721,28	9.126,20	13.543,50	0,00
Región de Murcia	2.731,00	1.003,00	1.728,00	0,00	0,00
Total	1.012.157,63	669.554,73	162.788,21	76.812,56	103.002,13
	(100%)	(66,2%)	(16,1%)	(7,6%)	(10,2%)

De acuerdo con el artículo 1.1 de la Ley 10/1998, de Residuos, el orden de prioridad en el que se debe decidir el destino final de los fangos es:

- La aplicación al suelo con fines de fertilización y reciclaje de los nutrientes y la materia orgánica
- Valorización energética (en todas sus variantes, incluida la Biometanización)
- Depósito en vertedero

1.4.2.1. Aplicación de fangos a suelos agrícolas

Esta forma de utilizar los fangos consiste en la incorporación de éstos a las tierras de cultivo mediante diferentes técnicas con el consiguiente aporte de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo. Consiste básicamente en aprovechar el contenido en elementos esenciales, oligoelementos y materia orgánica de los fangos para potenciar el desarrollo vegetal.

Los fangos pueden ser dispuestos directamente sobre el terreno agrícola o bien sufrir un compostaje previo a su aplicación. Esta segunda opción resulta ser la más viable ya que, con el compostaje se consigue la fermentación aerobia de la materia orgánica, obteniendo un producto final estable de tipo humus, higiénico y libre de características desagradables.

La aplicación de fangos a suelos agrícolas resulta en principio, una técnica ecológica y económicamente razonable, pero deben tenerse en cuenta determinados componentes como la presencia de microorganismos patógenos y metales pesados, que en determinadas proporciones pueden resultar nocivas para el suelo, los cultivos y por último para los consumidores del producto agrícola obtenido.

Por ello, la directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos en la utilización de lodos con fines agrícolas, transpuesta a la legislación española mediante el RD 1310/1990, establece las condiciones en las que podrán ser tratados los lodos, y sus aplicaciones e incidencia sobre el medio ambiente, los cultivos, los seres vivos y la salud en general.

Para llevar a cabo una reducción en el número de patógenos, la directiva establece que los fangos destinados al uso agrícola deben ser sometidos a un proceso previo de tratamiento. En lo que hace referencia al contenido en metales pesados, la directiva determina las cantidades máximas que pueden encontrarse en las tierras de cultivo así como las cantidades de fango a aplicar y los niveles máximos de estos metales en los mismos.

En España, la aplicación de los fangos a suelos agrícolas es un uso extendido en todo el territorio. El Registro Nacional de Lodos aporta cierta información acerca de la evolución de esta aplicación. Como se observa en la tabla 1.4, a lo largo del periodo 1998 a 2003 se produce un aumento progresivo de esta aplicación del fango. Esta tendencia porcentual es similar a la que presentan algunos países de la Unión Europea y Estados Unidos.

Tabla 1.4.- Evolución de lodos destinados a la agricultura, periodo 1998 a 2003

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Producción de lodos en las estaciones depuradoras ...	716.145	784.882	853.482	892.238	987.221	1.012.157
Lodos utilizados en la agricultura	353.986	413.738	454.251	606.118	658.453	669.554
Proporción lodos utilizados en agricultura	49,4%	52,7%	53,2%	67,9%	66,7%	66,2%

Fuente: Registro Nacional de Lodos.

1.4.2.2. Depósito al vertedero

El depósito de los fangos en vertederos controlados resulta ser la segunda alternativa más utilizada en España para evacuación de estos residuos. Consiste en la disposición de los fangos en depósitos especializados para ello. Este sistema de evacuación se ve mejorado junto con la aplicación de residuos sólidos urbanos, ya que estos le confieren cierta estabilidad además de una mejora a la hora de realizar las operaciones de acondicionamiento necesarias.

El lugar en el que se realice la evacuación de fangos, debe prestar atención a los siguientes aspectos:

- Evitar su aplicación a zonas medioambientalmente sensibles tales como terrenos pantanosos, llanos de inundación, zona de recarga de acuíferos, zonas de protección de especies....
- Debe realizarse un control de la escorrentía de aguas superficiales.
- Debe asegurarse la protección de las aguas subterráneas.
- Control de la contaminación atmosférica debida al polvo, materia particulada y olores.
- Control de los vectores transportadores de enfermedades.
- Y, por último, deben considerarse aspectos de seguridad relacionados con la presencia de materiales tóxicos, incendios y accesos.

Después de varios años, durante los cuales los residuos se descomponen y compactan, el emplazamiento destinado al vertido, puede ser utilizado con fines recreativos o a cualquier otro tipo de actividad que no suponga un grave inconveniente.

Esta opción, presenta una serie de desventajas y limitaciones que dan lugar a una regresión en esta práctica. Por un lado la escasez de espacio disponible, el rechazo social a la ubicación de vertederos en zonas habitadas y el aumento progresivo en la producción de fangos limita en gran medida la aplicación de esta alternativa. Por otro lado, con la entrada en vigor del reglamento de vertederos, así como las disposiciones de la Comunidad Europea (Directiva 99/31/CEE) respecto a las características que deben reunir los lodos para su disposición en el vertedero complican su aplicación

1.4.2.3. Incineración

La incineración de los fangos consiste en la destrucción térmica de este a elevada temperatura en presencia de exceso de aire, se puede llevar a cabo con recuperación energética o sin ella.

Con la incineración de los fangos se consigue una importante reducción del volumen de fango además obtener residuo final estable y libre de componentes orgánicos. El residuo obtenido es una ceniza que puede contener elementos tóxicos como metales, por ello debe buscarse la mejor

opción para el destino final, como puede ser su utilización en la fabricación de materiales cerámicos o proceder a la vitrificación de las mismas.

Este método de eliminación de fango conlleva un elevado coste económico y una alta contaminación atmosférica, siendo estas las causas por las que se encuentra prácticamente en desuso.

1.4.2.4. Vertido al mar

En Europa, esta práctica constituye aproximadamente un 5% de la producción total de fangos, a pesar de ello, actualmente, en España está totalmente prohibida debido a los problemas de acumulación y magnificación de los compuestos tóxicos en el medio marino.

La descarga de lodos se puede realizar en alta mar mediante barcos o bien, cerca de la costa a través de emisarios submarinos. Para ambos casos es importante realizar estudios previos necesarios para mantener un control de las condiciones del medio ambiente marino.

1.4.2.5. Otros destinos

Las nuevas y cada vez más exigentes directivas de gestión de residuos basadas en el desarrollo sostenible, han dado lugar a la búsqueda e investigación de nuevos métodos de evacuación y destino final de los fangos de depuradora. A continuación se realiza una breve descripción de las alternativas más válidas y eficaces surgidas durante los últimos años:

- Fangos como materia prima para la construcción:

La inertización de los lodos en matrices cerámicas permite la obtención de un producto apto para la fabricación de cemento u otros materiales de construcción como ladrillos. En el caso de la fabricación de ladrillos, los metales tóxicos contenidos en los fangos son inmovilizados al quedar retenidos en los cristales vítreos que forman.

- Fangos como material de restauración de espacios degradados:

La utilización de fango como material de restauración consiste en la aplicación directa de este en los terrenos degradados por actividades extractivas, incendios forestales o cualquier otra actividad que disminuya la funcionalidad del terreno, así como para el relleno de taludes, recuperación de minas...etc.

Los lodos se depositan mezclados con tierras total o parcialmente infértiles con al menos un 20% de fracción fina y un sistema de lixiviado. Tan sólo es necesaria una aplicación en el momento inicial, el lodo se descompone rápidamente, se forman colonias de lombrices y no se necesita

hacer siembra, al cabo de aproximadamente un año la vegetación en el espacio degradado es totalmente uniforme.

1.5. Tecnologías para la minimización del fango:

Frente a los métodos de evacuación de fango anteriormente descritos, se perfila otra línea de acción basada en el estudio y desarrollo de tecnologías orientadas a reducir la generación de fangos durante el proceso de tratamiento de este, más que tratar de minimizarlo una vez ha sido generado. Así pues, se definen tres líneas estratégicas de acción (Pérez-Elvira et al., 2006.):

Estrategia 1: Procesos en la línea de aguas

Estos procesos tienen lugar en la línea de tratamiento biológico de las aguas y van encaminados a reducir la cantidad de fangos a generar más que realizar un tratamiento posterior a su generación. En este sentido, se pueden distinguir dos tipos de procesos: los que van dirigidos a reducir el coeficiente de producción de fangos (ozonación, cloración...) y, por otra parte, los procesos con bajo coeficiente de producción (sistemas aerobios/anaerobios).

Estrategia 2: Procesos en la línea de fangos

Estos procesos de minimización van orientados a aumentar y mejorar el tratamiento de los fangos con el fin de reducir el exceso de producción de estos.

La digestión anaerobia de los fangos resulta ser el tratamiento estándar de estabilización y reducción de sólidos en las plantas de tratamiento debido al elevado contenido orgánico de estos. En este sentido, se definen dos líneas de tratamiento: las que realizan un pretratamiento del fango previo a su entrada en el digestor anaerobio (ultrasonidos, hidrólisis térmica...) o las que modifican el proceso de digestión anaerobia (AGF...).

Estrategia 3: Procesos en la línea final de desecho

Estas tecnologías van dirigidas a la minimización de fangos ya generados, con el fin de hacerlos libres de agua y patógenos así como para obtener un producto más estable. Todas estas tecnologías están basadas en la recuperación energética del fango (incineración, pirólisis, gasificación...).

La tabla 1.5 muestra los procesos destinados a la minimización de fangos que actualmente se encuentran en estudio, experimentación o funcionamiento (Pérez-Elvira et al., 2006.).

Tabla 1.5.-Procesos para la minimización de fangos.

Procesos en la línea de aguas	Procesos que reducen el coeficiente de producción	Rotura crítica del crecimiento	Oxidación química	Ozonación	
				Cloración	
			Integración de tratamientos químicos y térmicos		
			Procesos con oxígeno de alta pureza		
			Reacciones enzimáticas		
		Mantenimiento del metabolismo	Biorreactor de membrana		
		Desacoplamiento del metabolismo	Desacople químico		
			Proceso oxico-anaerobio (OSA)		
		Depredación de bacteria	Sistema en dos fases		
			Gusanos		
Procesos con bajo coeficiente de producción			Sistemas anaerobios/aerobios		
Procesos en la línea de fango	Procesos de pretratamiento previos a la digestión anaerobia	Pretratamientos físicos	Cavitación	Homogenizadores de alta presión	
				Homogenizadores ultrasónicos	
			Térmico	Hidrólisis térmica	
				Congelación y descongelación	
			Mecánico	Trituración por impacto	
				Molinos de bolas	
		Técnica de pulso de alta presión			
		Lisis celular por centrifugación			
		Radiación	Irradiación gamma		
		Pretratamientos químicos			Pretratamiento con ozono
				Hidrólisis ácida o alcalina	
	Pretratamientos biológicos				
	Pretratamientos combinados	Combinación de térmico, descompresión y fuerzas cortantes			
		Químicos mejorando la hidrólisis térmica			
	Modificando la digestión anaerobia	Digestión anaerobia en dos fases			
Digestión anaerobia en dos fases de temperatura					
Flotación anóxica del gas (AGF)					
Procesos en la línea de desecho	Incineración				
	Gasificación y pirólisis				
	Oxidación húmeda del aire (WAO)				
	Oxidación en condiciones supercríticas (SCWO)				

De todos los procesos de minimización nombrados, a continuación se describen aquellos sobre los que más estudios se han realizado y han sido llevados a la práctica con mayor éxito.

➤ Ozonación

Se trata del proceso en la línea de tratamiento del agua más estudiado y llevado a la práctica. Consiste en hacer pasar una fracción de fango recirculado a través de una unidad de ozonación. En ella, la mayoría de los microorganismos son destruidos y oxidados a compuestos orgánicos más fácilmente degradables en el posterior tratamiento biológico. Las futuras investigaciones sobre esta técnica van dirigidas a la optimización de la dosis de ozono, el modo de dosificación y la configuración del reactor.

➤ Homogenizador de alta presión

El sistema está formado por una bomba de alta presión que comprime el fango hasta alcanzar presiones muy elevadas (cientos de bares) y una válvula de homogenización en la que al pasar el fango por ella desciende la presión hasta alcanzar una presión similar a la del fluido, y aumenta la velocidad del fango hasta velocidades de 300 m/s.

Durante este último tramo del sistema en el que la presión desciende y la velocidad aumenta, se forman burbujas cavitacionales que al romperse elevan la temperatura del fluido hasta alcanzar cientos de grados Celsius, con la consiguiente rotura de las paredes celulares.

➤ Hidrólisis térmica

La hidrólisis térmica es una de las tecnologías que tienen lugar en la línea de tratamiento de fangos. El pretratamiento térmico consiste en la aplicación de temperatura al fango de forma que se produzca la destrucción de las paredes celulares haciéndolo más accesible a la degradación biológica. La temperatura óptima de trabajo de este proceso oscila entre 160 y 180 °C.

➤ Congelación y descongelación

Mediante el congelado y descongelado del fango biológico, la estructura flocular es transformada irreversiblemente a una forma más compacta, de modo que el contenido en agua se ve reducido mejorándose las características de degradabilidad del fango (Chu et al. 1999).

➤ Molino de bolas

Esta técnica consiste en hacer pasar el fango por un tanque cilíndrico o cónico en cuyo interior hay dispuestas unas bolas sometidas por un agitador a un movimiento rotatorio. La función de estas bolas es la de aplastar el fango a lo largo de su paso por el tanque de forma que se produzca la desintegración de los microorganismos mediante la acción de presión y fuerzas cortantes.

➤ Flotación anóxica de gas (AGF)

El proceso de AGF mejora el proceso de digestión anaerobia mediante el uso de gas anóxico. Se trata de hacer flotar las bacterias, ácidos orgánicos, proteínas, encimas y los substratos no asimilables en el digestor anaerobio para producir la conversión completa de estos a gas y compuestos solubles.

1.6. Ultrasonidos como técnica de minimización de fangos

Ultrasonido es el término que se emplea para describir las ondas de energía, con frecuencias alrededor de los 230 kHz, que se propagan por un medio, como resultado de un mecanismo de compresión/rarefacción.

Originariamente, esta técnica era empleada para extraer el material intercelular de las células microbianas (Harrison, 1991). Más tarde, este método ha sido reconocido por Chiu et al. (1997) y Thiem et al. (1997, 2001), como un pretratamiento para tratar la reducción del fango que se produce en las depuradoras de aguas residuales.

Con esta técnica se producen ondas de sonido de elevada intensidad que se van a propagar por el medio, produciendo una disipación de la energía y la rotura de las fuerzas atractivas de las moléculas de agua, dando lugar a la formación de burbujas. Estas burbujas se desplazan a zonas de mayor presión donde van a implosionar creando microrregiones (“hot spot”) con unas condiciones extremas de presión (aprox. 500 atm.) y temperatura (hasta 5000 °C) (Thiem et al., 2001). A este fenómeno se le conoce como “cavitación acústica”.

Estas condiciones conducen a efectos físico-químicos como son la rotura celular y la generación de radicales altamente reactivos (H⁺, OH⁻, HOO⁻) que reaccionan y degradan fácilmente los agentes contaminantes.

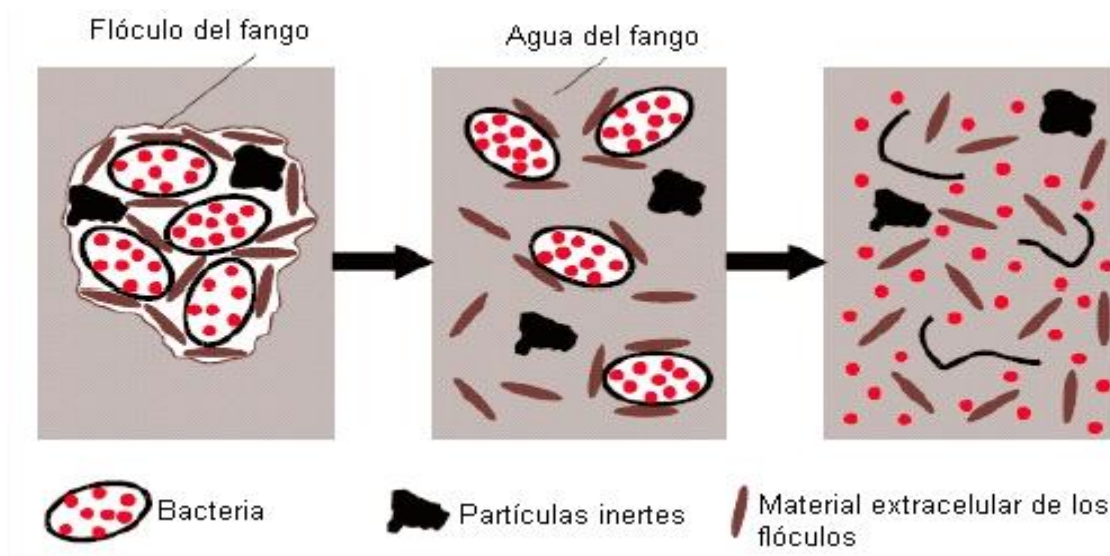


Figura 1.4. Modelo de desintegración de fango aplicando ultrasonidos.

Fuente. Benabdallah el Hadj T. et al, 2006.

Muchos estudios han demostrado que la aplicación de ultrasonidos antes de la digestión anaerobia, no sólo mejora el proceso de digestión y deshidratación, sino también, aumenta la solubilidad del fango y con ello, su biodegradabilidad. A su vez, esto se traduce en un aumento de la producción de gas en la digestión anaerobia y una reducción de los tiempos de digestión de hasta 12 días (Roxburg R. et al, 2006).

Hay dos sistemas diferentes para generar ultrasonidos: piezoeléctrico y magnetostrictivo. En ambos, la energía eléctrica pasa a través de una bobina magnética, que está junto a la punta de prueba o sonotrodo, generando energía mecánica o vibración. Los sistemas más adecuados para el tratamiento del fango son los piezoeléctricos debido a la elevada intensidad que alcanzan, siendo suficiente para romper el material celular del lodo.

Los dispositivos comerciales más conocidos y empleados son Sonix™ Y Sonolizer™, aunque es el primero el más distribuido internacionalmente como se verá más adelante.

Los componentes de un homogeneizador ultrasónico son:

- Generador que suministre un voltaje de alta frecuencia (20-40 kHz).
- Un convertidor que transforme los impulsos eléctricos en impulsos mecánicos.
- .Un sonotrodo que transmita los impulsos mecánicos al fango.

Los beneficios obtenidos mediante la aplicación de ultrasonidos son:

- Mejora general de los procesos microbiológicos de la etapa de digestión anaerobia: La rotura instantánea de las paredes celulares libera su contenido interno y agiliza los procesos biológicos producidos por la biomasa en el interior de los digestores.
- Aumento de la producción de biogás: Disponer de procesos biológicos favorables aumenta la producción de biogás y la capacidad de cogeneración de la EDAR, minimizando el consumo energético de la misma, con las correspondientes ventajas que implica.
- Minimización de la producción de fangos: Un aumento en la degradación de la materia volátil en el proceso de digestión conlleva una disminución en la producción de fangos.
- Mejora la sequedad y estabilización final del fango deshidratado: La rotura de las paredes celulares lleva consigo el desprendimiento del agua intersticial, aumentando la sequedad final, facilitando su posterior aplicación, mejorando la manipulación y reduciendo sus costes.
- Disminución de las espumas que se generan durante la digestión anaerobia debido a la destrucción de los microorganismos filamentosos: Esto provoca que se reduzcan los problemas en la línea de gas por el paso de espumas desde la cúpula del digestor a la línea.
- Se trata de una operación fiable debido a su alto grado de desarrollo e investigación.
- Reducción del tamaño de las partículas.
- Aumento de la fracción soluble.
- No se generan olores y no se producen problemas de incrustaciones y obstrucciones.
- Instalación fácil en la EDAR.

Los inconvenientes que se han podido observar aplicando esta técnica son:

- Erosión del sonicador, como consecuencia de las ondas de sonido de gran intensidad y de las elevadas temperaturas y presiones que se alcanzan. Este desgaste supone la sustitución anual de los cabezales.
- Balance energético negativo por el elevado consumo energético del equipo. Este consumo puede verse contrarrestado si la EDAR cuenta con un adecuado sistema de cogeneración de energía.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS:

Como se ha comentado en el primer apartado, la producción, tratamiento y destino final de los fangos de depuradora es uno de los problemas ambientales en el campo de la depuración de aguas que más polémica y debate genera en la actualidad.

Por ello, y con el fin de estudiar y conocer la técnica de minimización de fangos con ultrasonidos se ha realizado el presente trabajo cuyos objetivos se desarrollan a continuación:

- Conocer el funcionamiento de la técnica de ultrasonidos sobre el fango, con el fin de determinar la influencia sobre su minimización.
- Diseño y puesta en marcha de la técnica experimental para la sonicación del fango a escala de laboratorio.
- Caracterización físico-química del fango procedente de tres partes distintas de la E.D.A.R, incluyendo como parámetros de estudio la concentración total de sólidos, la fracción de sólidos volátil, la demanda química de oxígeno y la demanda biológica de oxígeno.
- Estudio de la influencia del tiempo de sonicado en la alteración de las características físico-químicas del fango.
- Comparación entre la degradabilidad del fango antes y después de la aplicación de ultrasonidos.

MATERIAL

Y

MÉTODOS

3.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	47
3.1.	TÉCNICAS ANÁLITICAS.....	47
3.1.1.	Solidos totales (ST), Solidos suspendidos (SS), Solidos Volátiles (SV)....	48
3.1.2.	Determinación Demanda Química de Oxígeno (DQOT y DQOS).....	51
3.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	47
3.1.	TÉCNICAS ANÁLITICAS.....	47
3.1.1.	Solidos totales (ST), Solidos suspendidos (SS), Solidos Volátiles (SV)....	48
3.1.2.	Determinación Demanda Química de Oxígeno (DQO _T y DQO _S).....	51
3.1.3.	Determinación Demanda Biológica de Oxígeno límite (DBO _L).....	56
3.2.	DETERMINACIÓN GRADO SOLUBILIZACIÓN.....	63
3.3.	RELACIÓN DBO/DQO.....	65
3.4.	TIPOS DE FANGO.....	65
3.4.1.	Fango flotado.....	67
3.4.2.	Fango mezcla.....	68
3.4.3.	Fango digerido.....	68
3.5.	Proceso experimental.....	69
3.5.1.	Equipo experimental.....	69
3.5.2.	Procedimiento experimental.....	70

3. MATERIAL Y MÉTODOS:

En este apartado se van a desarrollar las técnicas analíticas necesarias para determinar la materia orgánica biodegradable y no biodegradable de los fangos estudiados. Así mismo, se definirán los fangos seleccionados para llevar a cabo la técnica de sonicación. Por último se describirá el diseño experimental que se ha utilizado durante todo el estudio y el material necesario para la realización de la experiencia.

3.1. TECNICAS ANALÍTICAS:

El estudio de la biodegradabilidad del fango, se ha realizado en base al análisis de tres parámetros:

- Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV).
- Demanda Biológica de Oxígeno limite (DBO_L)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La metodología empleada para el análisis de cada uno de los parámetros es una adaptación a los definidos en “Métodos Normalizados para el tratamiento de aguas potables y residuales” (APHA, 1992). Así mismo, estas adaptaciones han sido desarrolladas por Viñó, 2007. Estas técnicas son:

- Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV). Adaptación al método 2540 E. Determinación por evaporación y pesada.
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Adaptación al método 5210 B. Método manométrico.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO). Adaptación al método 5220 B. Método de reflujo abierto.

3.1.1. SÓLIDOS TOTALES (ST), SÓLIDOS SUSPENDIDOS (SS) Y SÓLIDOS VOLÁTILES (SV):

El contenido en sólidos totales se define como toda la materia que queda como residuo después de someter una muestra a un proceso de evaporación a una temperatura de 103-105 °C. La materia que tenga una presión de vapor significativa a dicha temperatura es eliminada durante la evaporación y no se define como sólido.

A su vez, los sólidos contenidos en la muestra pueden clasificarse en base a su volatilidad a 550 °C. A esta temperatura, la fracción orgánica (volátil) y algunas sales minerales se oxidarán y serán volatilizadas, quedando la fracción inorgánica en forma de ceniza.

En este sentido, nos interesa conocer el contenido volátil de las muestras ya que nos aportará información sobre el contenido degradable de éste en el proceso de ultrasonidos.

- Material necesario:

El material necesario para la determinación de los sólidos es:

- Cápsula de porcelana
- Estufa de desecación ventilada
- Recipiente desecador
- Balanza de precisión
- Filtros
- Bomba de succión al vacío
- Horno de mufla

- Procedimiento:

-Sólidos totales método: 2540B

-Sólidos suspendidos método: 2540D

-Sólidos suspendidos volátiles método: 2540E

En primer lugar se secan las cápsulas de porcelana durante dos horas en la estufa con el fin de que no se produzca ningún error de pesada. Utilizaremos una capsula de tamaño mediano y otra más pequeña con un filtro de diámetro 0,45 µm. Tras dejarlas enfriar en el desecador durante 10 minutos, para que no adquiera más humedad, se pesan (P1)

Se vierte un volumen de fango de 50 mL en cada cápsula. Filtraremos 50 mL de fango para conocer la cantidad de sólidos solubles de la muestra, y se volverán a pesar ambas capsulas (P2). Es necesario que la muestra de fango se agite previamente para asegurar que la muestra es homogénea (no hay fango sedimentado).

Las cápsulas con el fango, se depositan en la estufa de desecación a 105 °C durante 24 horas. Es importante mantener este tiempo para asegurar la completa evaporación del agua contenida en el fango.

A las 24 horas, se sacan la cápsulas de la estufa y se dejan enfriar nuevamente en el desecador durante 10 minutos. Una vez enfriadas, se vuelven a pesar (P3). La diferencia entre esta pesada y la que se realizó con las cápsula vacías (P3 – P1), representa los sólidos totales contenidos en el fango.

El resultado de los sólidos totales y suspendidos se puede expresar de las siguientes formas:

$$ST (\%) = \frac{(P3-P1)}{(P2-P1)} \times 100 \quad (\text{Ec.3.1})$$

$$ST (mg/L) = \frac{(P3-P1)}{(V_{muestra})} \times 100 \quad (\text{Ec.3.2})$$

Una vez se han determinado los sólidos totales. La fracción volátil y no volátil se lleva a cabo por calcinación del residuo que ha quedado en la cápsula. Esta calcinación se realiza a temperatura de 550 °C.

Al calentar a esta temperatura, la materia orgánica se descompone en agua y en anhídrido carbónico, que se evaporan.

Para su determinación se deben introducir las cápsulas, que se han extraído de la estufa y se han pesado, en el horno de mufla y alcanzar los 550 °C. El ascenso de la temperatura debe ser pausada para evitar problemas de combustión espontánea de determinados componentes, por lo que el tiempo óptimo para que se alcance dicha temperatura es de una hora. Una vez se ha alcanzado, se debe mantener la cápsula a la misma, durante otra hora. Transcurrido este tiempo, se deja enfriar el horno y se extrae la cápsula del interior para dejarla enfriar en el desecador. Una vez fría, se pesa (P4).

La diferencia de peso entre los sólidos totales y esta última pesada nos determina la fracción no volátil. La fracción volátil será lo que resta a los sólidos totales.

Los resultados se pueden expresar de diversas formas:

- Sólidos no volátiles:

$$SNV (\%) = \frac{(P4-P1)}{(P2-P1)} \times 100 \quad (\text{Ec.3.3})$$

$$SNV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P4-P1)}{V_{muestra}} \times 100 \quad (\text{Ec.3.4})$$

- Sólidos volátiles:

$$SV (\%) = \frac{(P3-P4)}{(P3-P1)} \times 100 \quad (\text{Ec.3.5})$$

$$SV(mg/L) = ST - SNV \quad (\text{Ec.3.6})$$

A continuación se presenta de forma visual el resumen de la determinación de todas las fracciones de los sólidos analizados en este estudio.

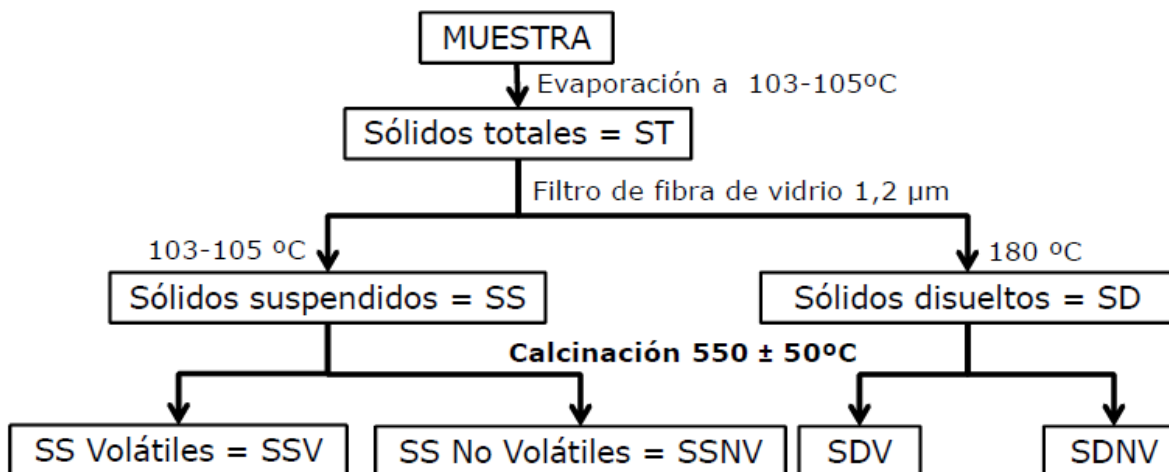


Figura 3.1.: Esquema-resumen sólidos

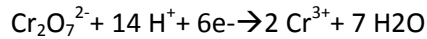
3.1.2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: DQO_{TOTAL} Y DQO_{SOLUBLE}

La demanda química de oxígeno se puede definir como la cantidad de oxígeno consumido, expresada en mg/L, en la oxidación de las sustancias reductoras presentes en una muestra de agua contaminada sin la intervención de los organismos vivos.

Básicamente mide la porción de materia orgánica, biodegradable o no, expresada en oxígeno, de una muestra que es susceptible de oxidación por un fuerte oxidante químico. En este caso utilizaremos el dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$).

Definiremos la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como la cantidad de O₂ químicamente equivalente al Cr₂O₇²⁻ consumido en este proceso. Dicha equivalencia queda establecida a partir de las reacciones de reducción-oxidación correspondientes (en medio ácido):

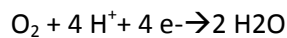
Semireacción para el dicromato:



(Naranja)

(Verde)

Semireacción para el oxígeno:



Como se puede observar, cada Cr₂O₇²⁻ consume 6 electrones al reducirse, mientras que cada molécula de oxígeno consume 4 electrones. Por consiguiente, el consumo de 1 mol de Cr₂O₇²⁻ en la oxidación es equivalente al consumo de 1.5 moles de O₂.

La DQO puede diferenciarse en fracción soluble y particulada. Nos interesa conocer ambas fracciones para conocer la biodegradabilidad y solubilidad de las muestras de fango.

- Material necesario para llevar a cabo la digestión:

-Tubos de ensayo de vidrio con tapon rosca

-Bloque digestor de calentamiento de aluminio fundido con agujeros ajustados al tamaño de los tubos de cultivo y capacidad de operación de 140±2 °C.

- Material de laboratorio DQO_{TOTAL}:

-Bureta de capacidad de 25 ml.

-Matraz erlenmeyer de un volumen de 500 ml.

-Pipeta de 10 ml.

-Espectrofotómetro digital.

- Reactivos utilizados:

-Solución de digestión de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) 0,25 N. Para ello, se deben disolver 12,259 g de dicromato, desecado previamente a $103\text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas, en 1 L de agua destilada.

-Sulfato de mercurio ($HgSO_4$) en forma de cristal o polvo.

-Ácido sulfúrico concentrado al 95-97%.

-Disolución ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfato de plata (Ag_2SO_4). Para ello, se deben añadir y disolver 15 g de sulfato de plata en 1 L de ácido sulfúrico concentrado al 95-97%.

-Disolución patrón de Ftalato ácido de potasio, 850 mg/L. Pesar 0.085 g del reactivo, disolver en agua destilada y diluir a 100 mL en matraz aforado.

- Material de laboratorio $DQO_{SOLUBLE}$

-Discos de filtrado, fibra de vidrio Whatman

-Matraz de succión de 500 ml.

-Bomba de succión al vacío.

-Espectrofotómetro digital.

- Fundamento:

El método empleado se basa en la reacción de una muestra con un oxidante enérgico, como es el dicromato potásico, en medio ácido sulfúrico con Ag^+ como catalizador y la determinación por colorimetría de la cantidad de dicromato consumida en este proceso.

Los compuestos orgánicos oxidables actúan reduciendo el dicromato, $Cr(VI)$, a ion crómico $Cr(III)$. La cantidad de dicromato consumido proporciona una medida de la concentración de contaminantes.

La utilización de la colorimetría (absorción visible-ultravioleta) para la determinación de la DQO se basa en los diferentes espectros de absorción del Cr(VI) (de color naranja, absorbe en longitudes de onda en torno a 440 nm) y el Cr(III) (de color verde, absorbe en torno a 600 nm), por lo que ambas especies se pueden detectar independientemente.

Realizaremos la calibración de la técnica con disoluciones patrón de Ftalato potásico (sustancia orgánica reductora), cuya DQO es conocida.

- Procedimiento:

-DQO total y soluble método: 5520D

Preparar los reactivos y los tubos, añadir a cada tubo (prepararemos 2replicas por muestra problema) el fango, directamente de la disolución madre o filtrado en el caso de la DQO soluble. Meteremos los tubos en el digestor durante 2 horas a 120 °C. Medir en el espectrofotómetro y registrar la absorbancia UV-visible a una longitud de onda de 410 y 445 nm. La longitud de onda más adecuada es la de 445 nm como ya se ha mencionado anteriormente pero mediremos ambas para poder comparar los resultados.

Construir la recta de calibrado representando (Apatrones - Ablanco) frente a la DQO de los patrones utilizados. Ablanco es la absorbancia del blanco, sin materia orgánica, que no se incluirá en la gráfica.

A partir de la ecuación de la recta de calibrado y la absorbancia de los distintos tubos, determinaremos la DQO (en mg/L de O₂) de la muestra problema. Multiplicando por el factor de dilución apropiado (ya que realizaremos las diluciones adecuadas para cada muestra de fango).

- Calibrado:

Mediante el ftalato potásico, nuestra muestra patrón con una DQO conocida realizaremos la recta de calibrado para poder determinar la DQO particulada y soluble de cada uno de los fangos problemas utilizados en este estudio.

A continuación se muestran los volúmenes utilizados de ftalato potásico los resultados de la QDO y la representación gráfica de las rectas de calibrado a las diferentes longitudes de onda; 410nm y 445nm. Sabiendo que para 0,1758g de ftalato potásico tendremos una DQO de 2067 mg/L.

Tabla 3.1.: Tabla resumen resultados

Muestra	Volumen(mL)	DQO(mg/L)	x1	x2	Abs 410	Abs 445
0	9,7	802	0,826	0,908		
1	7,3	604	1,450	1,680		
2	4,8	397	2,005	2,356		
3	2,4	198	2,566	3,018		
4	0,9	74	2,919	3,425		

→ $Abs = axDQO + b$

Tablas 3.2.: Resolución de la ecuación de la recta.

	$\lambda=410$
r2	0,9994
a	3,136
b	-2,85E-03

	$\lambda=445$
r2	0,9988
a	3,701
b	-3,43E-03

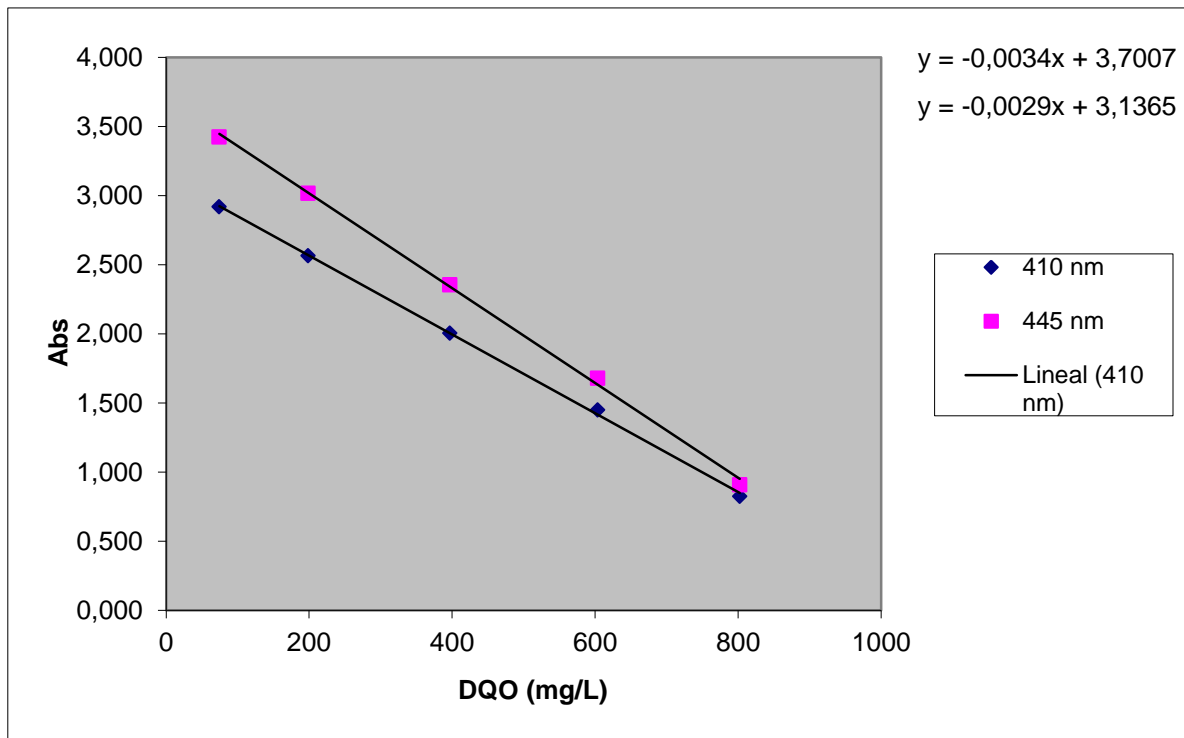


Figura 3.2.: Representación gráfica DQO total y absorbancia a las diferentes longitudes de onda.

3.1.3 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO_L):

-DBO: 5210C

La Demanda Biológica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno, expresado en mg/L, necesarios para descomponer la materia orgánica presente en una muestra por acción de los microorganismos.

En general, todas las sustancias orgánicas, inorgánicas y muchas sintéticas son atacadas por lo menos por una especie de microorganismos, ya que, el consumo de oxígeno en la oxidación biológica de estas sustancias es esencial para el mantenimiento y crecimiento de estos.

La oxidación biológica o digestión aerobia se basa en la combinación del oxígeno con los distintos componentes orgánicos, a través de una serie de reacciones que tienen lugar en la célula y que aportarán energía. Parte de esta energía se transformará en calor y la otra será utilizada por la célula para su respiración y generación de nuevas células. La causa principal del consumo de

oxígeno en aguas es la metabolización de la materia orgánica por las bacterias. La velocidad de consumo de oxígeno es paralela a la velocidad de crecimiento de las bacterias.

Estos procesos se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

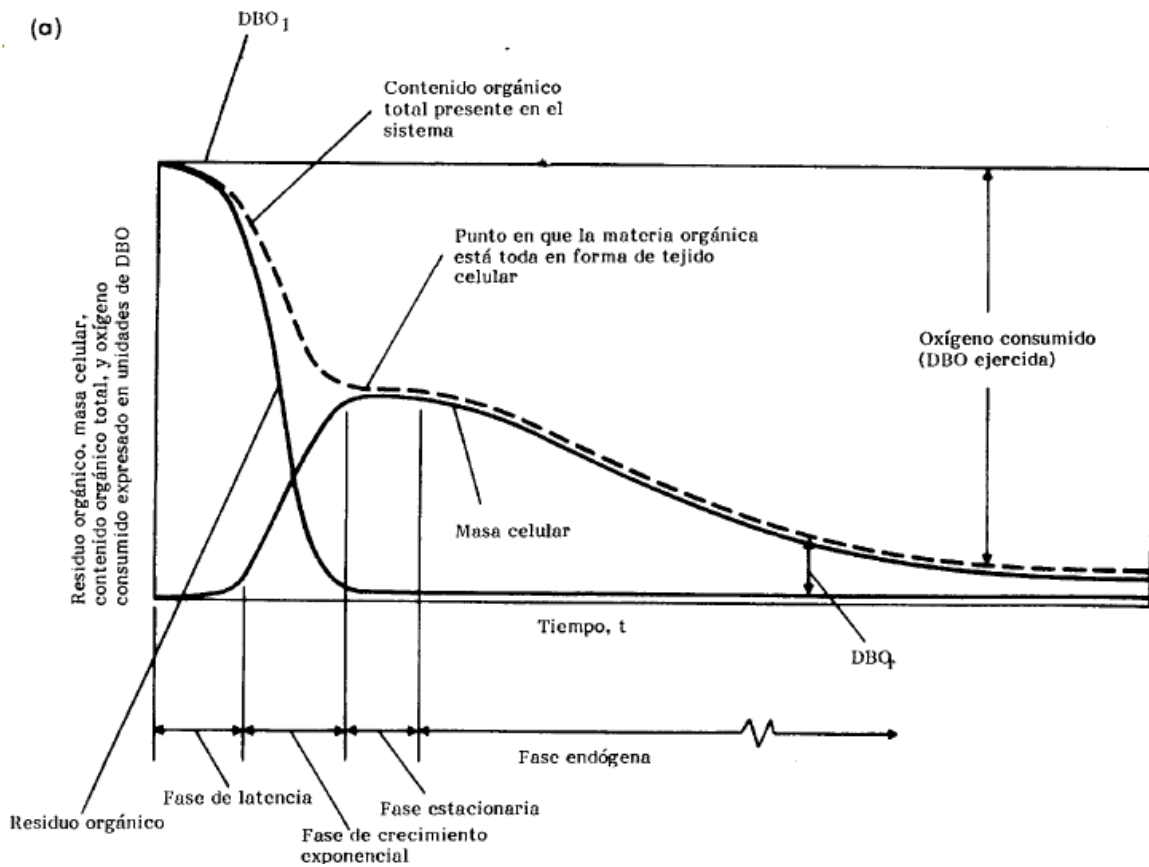


Figura 3.3.: Ciclo vital microorganismos:

El oxígeno disuelto en el agua y la cantidad de elementos nutrientes son factores limitantes para el crecimiento de los microorganismos y habrá que tener en cuenta que:

- La cantidad de oxígeno disuelto, presente en un agua, se reduce durante la estabilización de la materia orgánica contenida en ella.

- Mientras exista oxígeno disuelto en el agua, la velocidad de oxidación es independiente de la cantidad de oxígeno disponible.
- La variación en el contenido de oxígeno es función de la cantidad y tipo de materia orgánica.

La demanda de biológica de oxígeno es resultado de tres tipos de materiales:

- Materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por los organismos aerobios.
- Nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco, y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como fuente de alimentación para bacterias nitrificantes (Nitrosomonas y Nitrobacter).
- Compuestos químicos reductores de naturaleza inorgánica que se oxidan por el oxígeno disuelto (Fe^{2+} , SO_3^{2-} , SO_2^- , ...).

La determinación de la DBO incluye, en principio, tanto la DBO carbonosa como la no carbonosa. El consumo de oxígeno para la oxidación de materias nitrogenosas es lento, comenzando a ejercerse la DBO nitrogenosa (DBON) normalmente a partir de los 5 días. Si se considera que puede aparecer antes, puede ser inhibida empleando un agente inhibidor como la tiourea, la aliltiourea o la 2-cloro-6-triclorometilpiridina. Utilizaremos la aliltiourea.

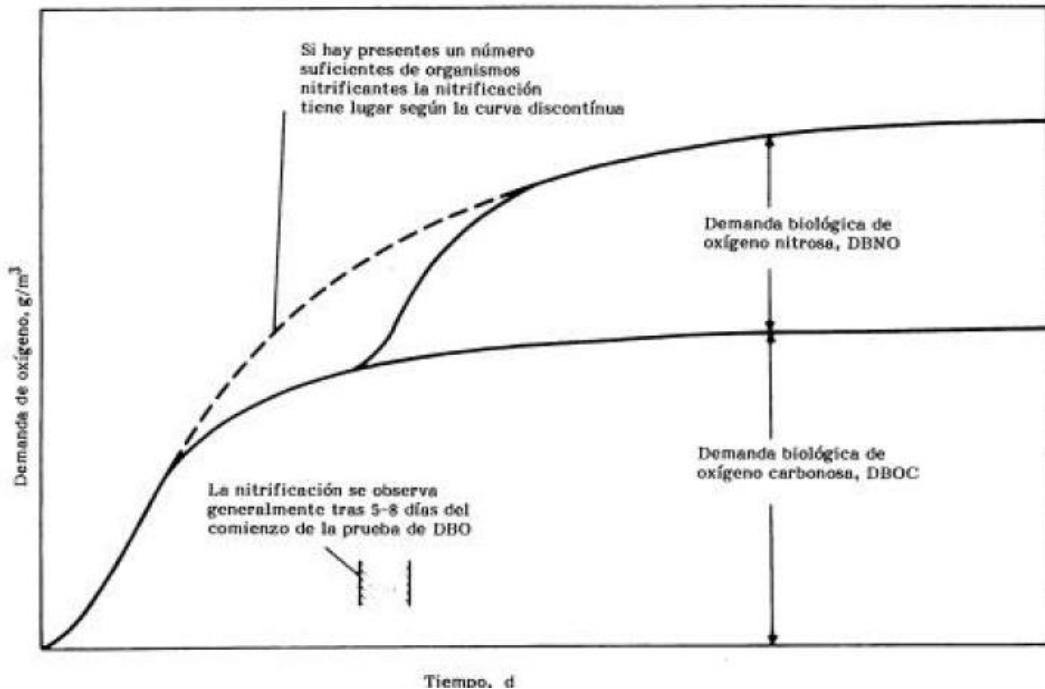


Figura 3.4.: Interferencia microorganismos nitrificantes.

Los principales productos finales de la oxidación carbonosa de la materia orgánica son dióxido de carbono, amoníaco y agua.

El valor de la DBO límite (DBOL) se obtiene aproximadamente a los 30 días, pero en la práctica se suele utilizar como valor estándar el valor de la DBO a los 5 días (DBO5).

En un agua determinada existe un cierto contenido de materias orgánicas (alimentos) y de microorganismos (consumidores). Si medimos el oxígeno disuelto (O.D) al tiempo t_0 y al tiempo t , la diferencia entre $(O.D)_t$ y $(O.D)_{t_0}$ representa, indirectamente, el gradiente de actividad biológica que ha tenido lugar en el intervalo $(t - t_0)$. Esta actividad biológica, responsable del consumo de oxígeno es, a su vez, una función de la cantidad de materia nutritiva transformada por los procesos bioquímicos, en el mismo intervalo de tiempo. Así, la DBO en mg/l, para un intervalo de tiempo determinado se calculará como la diferencia entre $(O.D)_{t_0}$ y $(O.D)_t$.

Para estimar el valor de la DBO se utiliza un modelo cinético de primer orden. En este modelo se supone que el consumo de oxígeno es sólo función de la DBO residual

$$d\text{DBO}/dt = -k [\text{DBOr}] \quad (\text{Ec.3.7})$$

Dónde:

DBOr: DBO residual a tiempo t (mg/l).

k: constante de velocidad de la reacción (t-1).

El efecto de la temperatura está incluido en la constante de velocidad ($k = A \cdot \exp(-E/RT)$).
Integrando entre los límites iniciales $\text{DBOr}=\text{DBOl}$ para $t=0$ y $\text{DBOr}=\text{DBOr}$ para $t=t$

Obtenemos:

$$\ln \text{DBOr}/\text{DBOl} = -k t \quad (\text{Ec.3.8})$$

Y resolviendo entre los límites de integración se obtiene:

$$\text{DBOr} = \text{DBOl} \cdot e^{-kt} \quad (\text{Ec.3.9})$$

Dónde:

DBOl: DBO carbonosa límite en mg/l.

En la Figura 3.5. se muestra una representación de la variación teórica de la DBO con el tiempo. Como puede observarse, el valor de la DBO crece exponencialmente hasta los 5 días llegando a representar entre el 55 y el 97% de la DBOL. A partir de los 5 días, la DBO crece ligera y asintóticamente.

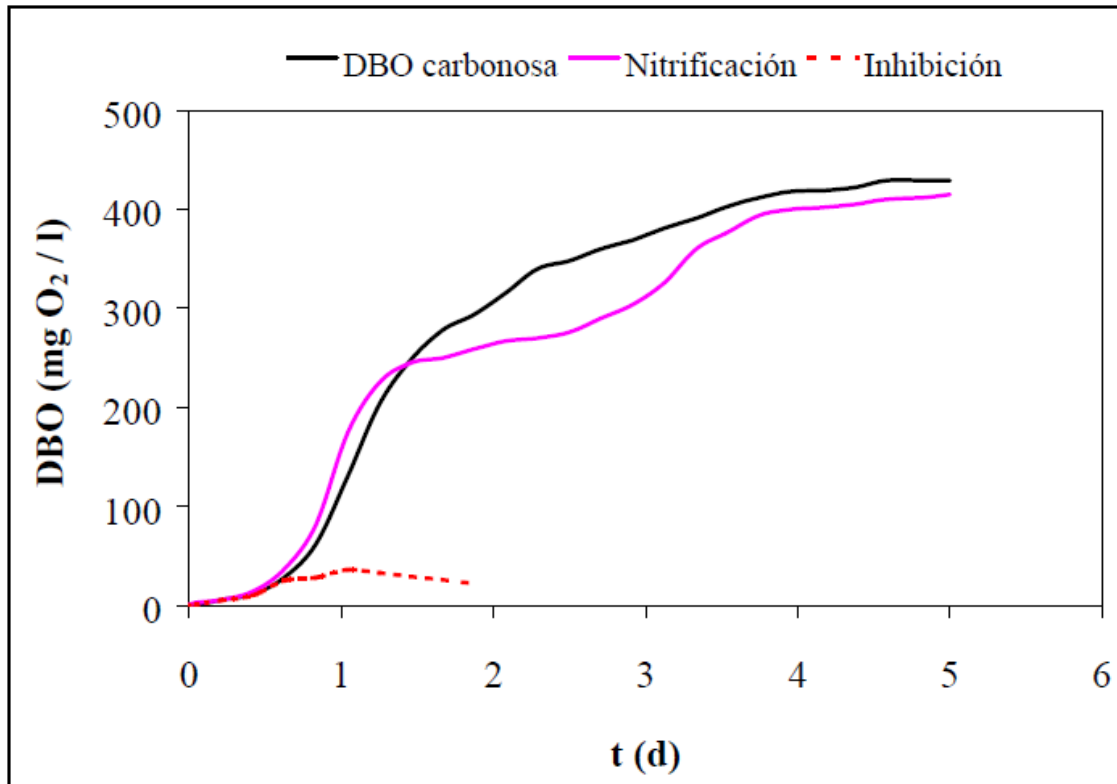


Figura 3.5.: Variación teórica de la DBO con el tiempo.

Al igual que la DQO, la DBO puede diferenciarse en dos fracciones: soluble y particulada. Pero solo analizaremos la particulada, por tanto no podremos conocer con exactitud la biodegradabilidad del fango.

- Material:
 - Botellas de incubación con una capacidad de 250 a 300 ml.
 - Agitadores magnéticos o pececillos.
 - Tapones de caucho con un receptáculo de dimensiones suficientes como para introducir el hidróxido de sodio.
 - Pipeta digital.
 - DBO metro (OXITOP), se trata de un sensor de presión que permite el almacenamiento de datos durante 30 días.

- Reactivos:

- Disolución de fosfatos: se disuelven 8.493 g de monohidrógeno fosfato de sodio ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y 2.785 g de dihidrógeno fosfato de potasio (KH_2PO_4) en 1 l de agua destilada.

- Disolución de sulfato de magnesio de concentración 20 g/l.

- Disolución de cloruro de calcio de concentración 25 g/l.

- Disolución de cloruro férrico de concentración 1.5 g/l.

- Disolución de cloruro de amonio de concentración 2 g/l.

- Disolución de la alitiourea de concentración 5 g/l.

- Hidróxido sódico (lentejas)

- Procedimiento:

-DBO limite método: 5210C

En primer lugar hay que establecer que volúmen de fango es el adecuado para incubar. Para, ello se ha de tener en cuenta que el volúmen de la muestra a tomar se encuentra entorno al 50-60% de la DQO de la muestra. Según el volumen utilizado se deberá multiplicar el valor de la DBO leída en el DBO-metro por el factor multiplicativo que se da en la siguiente tabla:

Tabla 3.3.: Valores esperados de DBO.

DBO5 esperada	Volumen muestra (mL)	Factor multiplicativo
0 – 40	432	X1
0 – 80	365	X2
0 – 200	250	X5
0 – 400	164	X10
0 – 800	97	X20
0 – 2000	43.5	X50
0 – 4000	22.7	X100

(Fuente. APHA-AWWA-WPCF, 1992)

Debido a la elevada DBO límite y DQO que presenta el fango se han tenido que realizar diluciones previas para ajustar la DBO límite esperada a alguno de los rangos que figuran en la tabla anterior. De acuerdo a las características del fango y a la DQO que presenta, se estima que el rango más adecuado para la determinación de la DBO límite es: 0-800. Por tanto, se deberá tomar 97 mL de muestra, y añadir las correspondientes botellas de incubación.

A continuación se añaden las sales para proporcionar los nutrientes que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica. La proporción en la que se deben añadir es:

- Sulfato de magnesio: 0.1 ml
- Cloruro cálcico: 0.1 ml
- Cloruro amónico: 0.1 ml
- Cloruro férrico: 0.1 ml
- Fosfatos: este volumen se calculará según la siguiente expresión:

$$V_{fosfatos}(mL) = \frac{2.75 \times 10^{-2} \times V_{muestra}(mL) \times DQO \left(\frac{mg}{L}\right)}{9318} \quad (EC.3.10)$$

Una vez añadidos los reactivos se tapan las botellas con los tapones de caucho en los que se añadirá el hidróxido de sodio para eliminar el CO₂ que se va a ir formando. Y se tapan herméticamente con los Oxitop.

El cálculo de la DBO límite consiste en multiplicar el valor leído en el DBO-metro treinta días después de realizar la incubación por el factor multiplicativo correspondiente, teniendo en cuenta las diluciones realizadas.

3.1.4. Determinación del grado de solubilización

Una vez determinados los parámetros más representativos de la biodegradabilidad del fango, interesa estudiar en qué medida la sonicación de la muestra afecta a su grado de solubilización. El grado de solubilización de una muestra representa la transferencia de materia orgánica particulada del fango a la fracción soluble del mismo.

- Solubilización DQO

La solubilización de la DQO (SDQO) representa la transferencia que se produce de DQO de la fracción particulada a la fracción soluble de la misma, como consecuencia de la sonicación.

La SDQO se calcula utilizando la diferencia entre la fracción soluble de DQO y la DQO inicial (muestra sin sonicar), y relacionándolo con la fracción de DQO particulada de la muestra de fango inicial. La siguiente expresión determina el cálculo de la SDQO:

$$SDQO = \frac{DQOs - DQOs_0}{DQOp_0} \times 100 \quad (\text{Ec.3.11})$$

Donde:

-DQOS es la DQO soluble en mg/L tras la aplicación de ultrasonidos.

-DQOS,0 es la DQO soluble en mg/L de la muestra de fango sin sonicar.

-DQOP,0 es la DQO particulada en mg/L de la muestra de fango sin sonicar.

- Velocidad de solubilización:

Conocer a la velocidad a la que sucede tal proceso es interesante en nuestro estudio para determinar el tiempo óptimo de sonicación, así como observar la diferencia de eficacia que puede ocurrir según la naturaleza del fango analizado. La siguiente expresión determina la velocidad de solubilización

$$V(t) = \frac{SDQO}{t} \quad (\text{Ec.3.12.})$$

Donde:

SDQO: es el valor de la solubilidad de la DQO

t: es el tiempo de sonicación

3.1.5. Relación DBO/DQO

La DBO5 no puede representar la carga contaminante total, debido a la existencia de ciertas moléculas en el fango que pueden ser difíciles o imposible de ser asimiladas por los microorganismos utilizados y no se ha podido oxidar totalmente

Es por ello, que toda expresión de DBO debe ir acompañada de una determinación de DQO (expresada igualmente en mg/l. de O₂), de forma que su comparación con el valor de la DBO, nos pueda aportar información ventajosa en la estimación de la biodegradabilidad del fango.

Así pues, se denomina "ratio" a la relación existente entre la DBO5 y la DQO, de forma que tal y como establece Singh, 1971:

-Para valores de $DBO/DQO \geq 0.5$, denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad.

-Para valores de $DBO/DQO < 0.5$, permiten sospechar la presencia de sustancias tóxicas como metales pesados, cianuros, cloro... que retardan o inhiben la biodegradabilidad en presencia de sustancias carbonadas, resistentes ellas mismas a la descomposición biológica.

3.2. TIPOS DE FANGO:

El fango empleado para la realización de este proyecto se ha tomado de la E.D.A.R Safor Sur-Gandia. Esta planta recoge el agua residual del Sur de la comarca de la Safor a través de cinco colectores municipales:

-Colector Gandia ciudad

-Colector del grao de Gandia y playa

-Colector general sur. Incorpora Piles, La Font d'En Carròs, Rafelcofer,

-Alquería de la Comtessa, Palmera, Bellreguard, Miramar, Guardamar y Daimús.

-Colector de Beniarjó. Incorpora Villalonga, Potriés, Almoines, Beniflá y Beniarjó.

Se estima que el caudal máximo que entra a la planta es de 60.000 m³ en verano y de 40.000 m³ en invierno. Debido a esta diferencia de caudal, la planta cuenta con dos tratamientos en la línea de agua: un tratamiento biológico que trata 40.000 m³ y un

tratamiento físico-químico que trata los restantes 20.000 m³ en el periodo estival. A la línea de agua corresponden los tratamientos 3, 4, 6, 8, 10 y 11 de la figura 3.5.

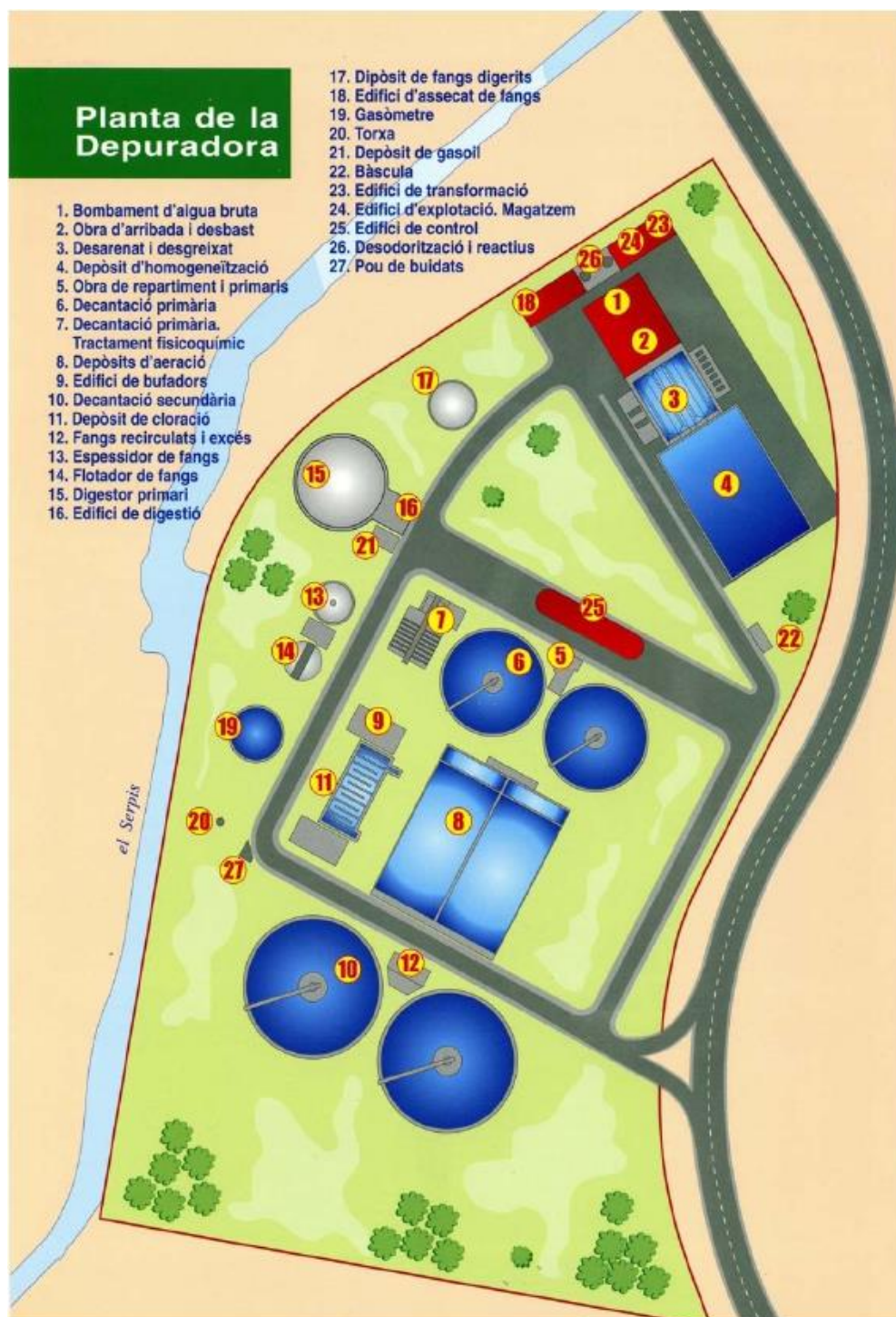


Figura 3.6.: Esquema EDAR Gandia (Safor).

Los residuos recogidos en cada proceso de la línea de agua son tratados en la línea de fango. Como se muestra en la figura 3.6, esta línea cuenta, para el tratamiento de fangos con: flotador de fangos (14), espesamiento de fangos (13), digestor primario (15), depósito de fangos digeridos (17) y con un depósito de desecación de fangos que cuenta con centrifugas como operación de deshidratación (18).

De esta línea se han tomado tres fangos procedentes de los procesos de flotación, digestión y de una arqueta común de la flotación y espesamiento. En la figura 3.6, se localizan los puntos de muestreo de los tres tipos de fango.

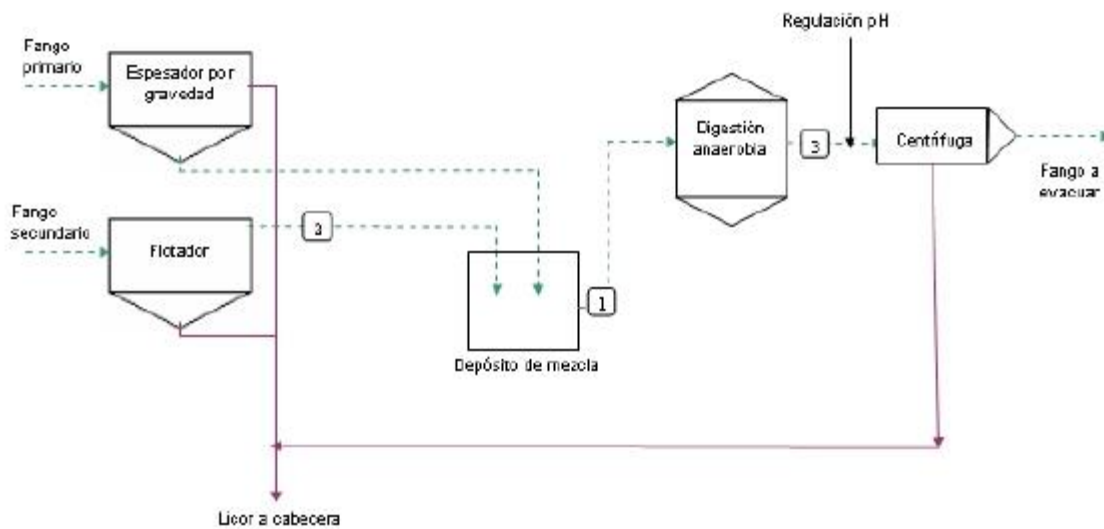


Figura 3.7.- Localización de los puntos de muestreo del fango mezcla (1), fango flotado (2) y fango digerido (3).

Las características de los fangos seleccionados para la aplicación de la técnica experimental se resumen en los siguientes puntos.

3.2.1 FANGO FLOTADO

El fango flotado corresponde al fango procedente de la decantación secundaria, conocido como fango activado. Son fangos de baja densidad y de apariencia floculenta, compuestos fundamentalmente por microorganismos filamentosos, de ahí que la operación adecuada para su espesamiento, sea la flotación. Son de color marrón y se vuelven putrescibles rápidamente.

3.2.2. FANGO MEZCLA:

Como su nombre indica, este fango es una mezcla de los fangos procedentes del flotador y del espesador. Ambos fangos, pasan a una arqueta común desde donde son conducidos periódicamente a la digestión anaerobia. Es, por tanto, una mezcla de fangos primarios y secundarios, compuesto, tanto por sólidos suspendidos como por microorganismos. Es de color marrón y tiende a volverse séptico rápidamente. En caso de que el tratamiento físico-químico se encuentre en funcionamiento, puede tomar una coloración más oscura, provocada por algunos de los productos químicos que se añaden en este tratamiento.

3.2.3 FANGO DIGERIDO

El fango digerido es el resultado de digerir aerobia/anaerobiamente el fango primario y secundario. En el caso de este estudio, el fango procede de la digestión anaerobia. Es un fango de color marrón oscuro-negro que contiene grandes cantidades de gas metano. Cuando está totalmente digerido su olor es débil, sin ser molesto. Presenta grandes cantidades de macro y micronutrientes y, en zonas industriales, grandes cantidades de metales pesados.

Una vez conocidas las características fisiológicas del fango y para llevar a cabo este estudio, ha sido necesario llevar a cabo la caracterización físico-química de los fangos mencionados. La caracterización del fango es un paso necesario a realizar, antes de aplicar ultrasonidos al fango, ya que uno de los objetivos de este proyecto es estudiar el efecto de los ultrasonidos en la biodegradabilidad de distintos tipos de fango y realizar una comparación entre los mismos. Para que el estudio sea completo y saber si realmente este propósito se cumple, es imprescindible conocer las características iniciales de los fangos, y así comprobar si aplicando ultrasonidos estas características se ven modificadas.

Esta caracterización se ha basado en el análisis de los tres parámetros de más relevancia en el análisis de aguas residuales. Estos parámetros son: sólidos y demanda química y biológica de oxígeno. Las técnicas utilizadas para el análisis de estos parámetros son las descritas en el apartado 3.1.

La elección de estos parámetros para su caracterización, se ha hecho en base, a que en las experiencias posteriores se va a trabajar con estos mismos parámetros y por tanto, se hace necesario conocer sus valores iniciales. Más adelante se explicarán los valores iniciales de cada parámetro en el apartado 4.1.

3.3. PROCESO EXPERIMENTAL:

En este punto se va a mostrar el diseño experimental que se ha seguido para desarrollar los ensayos de sonicación. Para ello es necesario que, previamente, se describa el equipo que se va a emplear y el procedimiento a seguir en estos ensayos.

3.3.1. EQUIPO EXPERIMENTAL:

En este apartado se explicaran todos los elementos necesarios para llevar a cabo la experiencia.

- **Sonicador:**

El sonicador empleado para la experimentación es un SONOPLUS Ultrasonic Homogenizers GM 200, para volúmenes comprendidos entre 50 y 1000 mL. Está constituido por tres elementos:

-Generador de alta frecuencia GM 200, con una potencia de 200 W y 20 kHz de frecuencia.

-Material piezoeléctrico que transforma los impulsos eléctricos en mecánicos

-Sonotrode o punta de sonicación, "Microtip MS 73", que transmite los impulsos mecánicos al fango.

- **Agitador:**

El modelo de calentador-agitador empleado durante la experimentación es Agimatic-N (Pselecta), y trabaja a una potencia de 230 V y una frecuencia de 50 Hz.

La función del agitador ha sido mantener el fango en continua mezcla, asegurando una total homogeneidad de la muestra durante la sonicación.

- **Material de laboratorio:**

Vasos precipitado, pipetas, balanza analítica, soporte para aguantar la punta del sonicador etc.

3.3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Estudios realizados por diversos autores investigan la influencia de parámetros como tiempo, temperatura (Zang, et al. 2007; Wang, et al. 2006; Bourgrier, et al. 2005, 2006) o amplitud de sonicación (Thiem, et al. 2000; Wang, et al. 2005) en la eficacia del tratamiento de ultrasonidos en los fangos de depuradora.

En este sentido, el diseño experimental del presente estudio, se ha basado en la consecución de una serie de experimentos que permitan variar estos parámetros influyentes, y así, poder estudiar su efecto sobre la biodegradabilidad de los fangos en diferentes condiciones.

A continuación se describen los parámetros a partir de los cuales se ha elaborado el diseño experimental del presente estudio:

- Tiempo:

De acuerdo con Zang et al. 2007, tiempos mayores de 60 minutos de sonicación no producen un efecto significativo de desintegración e inactivación en el fango. Por ello, se han seleccionado dos tiempos que permitan definir la influencia del tiempo en la biodegradabilidad de los fangos durante el periodo en el que se producen dichos efectos. Así pues, los tiempos empleados han sido de un periodo muy corto 60 segundos y 90 segundos.

- Temperatura:

Hemos considerado que la temperatura no es de vital importancia y por tanto hemos trabajado en todo momento en temperatura ambiente sin modificar en ningún momento la misma. Ya que en otros estudios tales incrementos de la temperatura no han dado resultados notorios y por otra parte consideramos más oportuno el ahorro de energía.

- Amplitud de sonicación:

La amplitud de una onda se define como una perturbación propagada en un medio y se caracteriza por el transporte de energía que realiza. Se ha trabajado con la misma amplitud de onda: 40%.

La energía aplicada durante el proceso de sonicación presenta una relación proporcional con la amplitud de oscilación de la onda ultrasónica. Esta relación se observa en la siguiente ecuación, donde m_i es la masa de la partícula, ω es la frecuencia angular y ψ es su amplitud.

$$E_i = \frac{1}{2} m i \omega^2 x \forall o^2 \quad (\text{Ec. 3.12})$$

A su vez, la energía aplicada puede expresarse o calcularse mediante la siguiente ecuación: $\omega \forall$

$$E_s \left(\frac{KJ}{KG} \right) = \frac{p(w) x t (S)}{V(L) x STO (Kg)} \quad (\text{Ec.3.13})$$

Donde P es la potencia del sonicador expresada en W, t es el tiempo de sonicación en segundos, V es el volumen sonificado en litros y, por último, ST0 es la concentración de sólidos totales de la muestra de fango sin sonificar.

A partir de las variables de estudio y sus condiciones de aplicación, la tabla 3.4. muestra el diseño experimental de la sonicación del fango llevado a cabo en el presente trabajo. El volumen empleado en cada uno de los experimentos será siempre de 400 mL con un factor de dilución 2x2.

Tabla 3.4.: *Diseño experimental:*

BLOQUE	EXPERIMENTO	NATURALEZA FANGO	INTENSIDAD (%)	TIEMPO DE SONICACIÓN (s)
I	1	Flotado	40	60
I	2	Flotado	40	90
II	3	Mezcla	40	60
II	4	Mezcla	40	90
III	5	Digerido	40	60
III	6	Digerido	40	90

Como se puede observar en la tabla anterior, se va a realizar un total de 6 experimentos, 2 para cada tipo de fango. Se sonificará a dos tiempos diferentes (60,90 segundos), a temperatura ambiente y se mantendrá constante la intensidad de sonicación al 40%.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE **LOS RESULTADOS**

4. PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	74
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS FANGOS.....	74
4.2. EFECTO DE LOS ULTRASONIDOS EN LOS DISTINTOS TIPOS DE FANGOS.....	77
4.2.1. Fango flotado.....	77
4.2.2. Fango mezcla.....	79
4.2.3. Fango digerido.....	81
4.3. VARIACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD.....	83
4.3.1. Grado de solubilización.....	84
4.3.1.1. Velocidad de solubilización de la DQO.....	86
4.3.2. Relación DBO/DQO (ratio).....	87
4.4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FANGO.....	89

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS:

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en la puesta a punto de la técnica experimental con el fin de comprobar su funcionamiento. Posteriormente se expondrán los resultados de la aplicación de la técnica de sonicación sobre los tres tipos de fango de estudio (mezcla, flotado y digerido). Por último, y tras mostrar todos los resultados, se verificará si, después de aplicar dicha técnica, se cumplen los objetivos iniciales definidos y en qué medida se puede considerar una técnica fiable para su posible uso a escala real.

4.1. Caracterización de los distintos tipos de fangos:

Como se ha comentado en apartados anteriores, los fangos empleados para llevar a cabo la experimentación y su posterior estudio, proceden de la depuradora de Gandía y zona Sur de la Safor. En el apartado 3.2., donde se describe de forma detallada las características de cada uno de los fangos. En todo caso, interesa recordar brevemente el tratamiento de los lodos en la línea de fangos.

En esta línea de tratamiento, los fangos procedentes de la decantación primaria son espesados por gravedad y los secundarios mediante flotación. Ambos, junto a los fangos producidos por el tratamiento fisicoquímico, son mezclados y dirigidos al digestor anaerobio donde se verá reducido su contenido orgánico. Posteriormente, el fango obtenido es deshidratado y estabilizado con centrífugas.

Durante el periodo de análisis, que comprende desde el 15 de Febrero de 2013 hasta el 30 de Julio de 2013, se han extraído muestras de fangos de la arqueta común de mezcla de fangos flotados y espesados, del flotador y del digestor anaerobio. El siguiente diagrama muestra la línea de fangos de la depuradora y los puntos de muestreo.

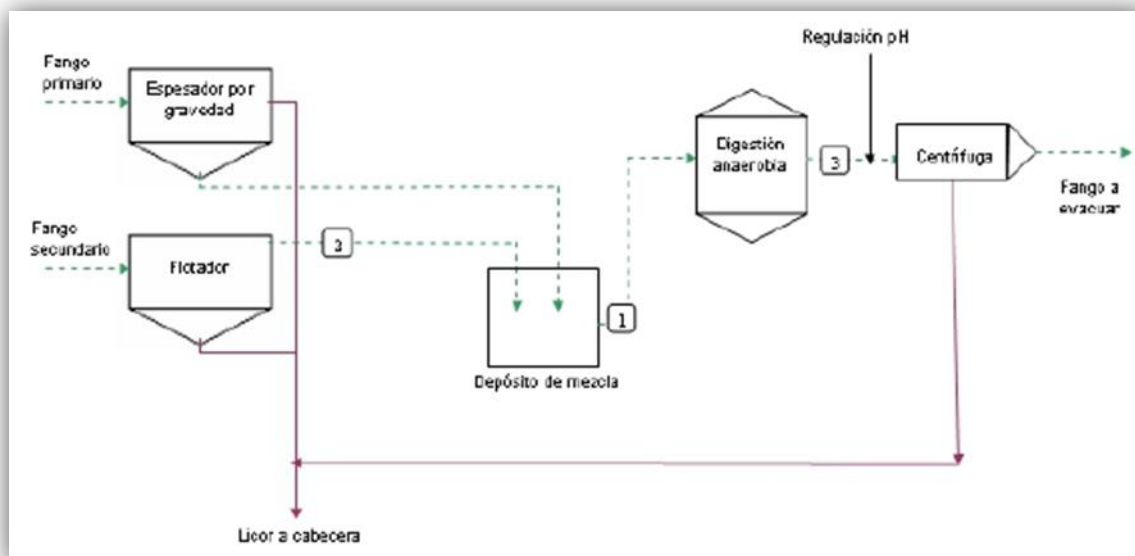


Figura 4.1: Localización de los puntos de muestreo del fango mezcla (1), fango flotado (2) y fango digerido (3).

A continuación, se describen brevemente los fangos empleados para llevar a cabo el estudio. Para ello, se ha realizado una caracterización físico-química de estos, con el fin de conocer sus condiciones iniciales antes de la sonicación. Esta caracterización previa de los fangos es necesaria para poder comparar y estudiar el efecto de la sonicación en los diferentes parámetros de estudio y en las diferentes condiciones de experimentación. La caracterización se ha basado en la determinación de los tres parámetros indicadores de biodegradabilidad y calidad de agua más utilizados: Sólidos, DQO y DBO_L . Las técnicas analíticas llevadas a cabo para la determinación de estos parámetros son las descritas en el apartado 3.1.

-El fango flotado procede de la decantación secundaria y posteriormente serán mezclados con los fangos espesados. Al tratarse de un fango secundario la carga de microorganismos es elevada, por ello esperamos una DBO elevada. Fisiológicamente se caracteriza por tener un color marrón y se vuelven putrescibles rápidamente.

-El fango mezcla, como su nombre indica, procede de la arqueta común en la que se mezclan los fangos flotados (decantación secundaria) y espesados (decantación primaria), para ser posteriormente enviados al proceso de digestión anaerobia. Así pues, al tratarse de una mezcla de fangos primarios y secundarios, su contenido es tanto de sólidos suspendidos como de microorganismos. Por una parte el fango espesado aportará una gran cantidad de sólidos y el fango flotado como anteriormente se ha comentado aportará una gran carga de microorganismos. En cuanto a sus características fisiológicas, son de color marrón a gris y tienden a volverse sépticos rápidamente, dando mal olor con gran facilidad, como ya se ha comentado anteriormente.

-El fango digerido tiene lugar en los procesos de digestión anaerobia. Es marrón oscuro, y contiene una cantidad excepcionalmente grande de gas. Cuando está totalmente digerido no es perjudicial, siendo su olor relativamente débil y parecido a la del alquitrán caliente, goma quemada o lacre. En este tipo de fango esperamos que este más o menos estable, es decir que su contenido en materia orgánica sea relativamente baja, ya que se ha generado al final de la línea del tratamiento de fangos. Conforme el fango se va secando, los gases se escapan dejando una superficie con grietas y un olor que recuerda al abono del jardín.

- Fango flotado:

La tabla 4.1. muestra los rangos de valores entre los que se encuentran los parámetros analizados y los valores promedios de Sólidos, tanto totales como la fracción orgánica, DQO y DBO limite obtenidos en la en la caracterización físico-química del fango flotado

Tabla 4.1.: Resumen resultados caracterización fango flotado

ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DBOL(mg/L)
3858	1745	696	3162	1545	200	47459	765	26635

- Fango mezcla:

La tabla 4.2. muestra los rangos de valores entre los que se encuentran los parámetros analizados y los valores promedios de Sólidos, tanto totales como la fracción orgánica, DQO y DBO limite obtenidos en la en la caracterización físico-química del fango mezcla.

Tabla 4.2.: Resumen resultados caracterización fango mezcla.

ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DBOL(mg/L)
970	855	182	788	657	198	9962	377	5407

- Fango digerido:

La tabla 4.3. muestra los rangos de valores entre los que se encuentran los parámetros analizados y los valores promedios de Sólidos, tanto totales como la fracción orgánica, DQO y DBO limite obtenidos en la en la caracterización físico-química del fango digerido.

Tabla 4.3.: Resumen resultados caracterización fango digerido.

ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DBOL(mg/L)
1981	1403	339	1642	1328	1063	30466	1824	6140

4.2. Efecto de los ultrasonidos en los distintos tipos de fango

Una vez conocidos y caracterizados los tres tipos de fango estudiados en este ensayo, razonaremos cómo evolucionan los distintos parámetros analizados tras sonicar cada uno de los fangos a distintos tiempos (a 60 y 90 segundos).

4.2.1. Fango flotado

Los resultados de sólidos, DQO y DBO correspondiente al fango flotado para los tiempos de sonicación del estudio se exponen y analizan a continuación.

- **Sólidos**

Tras llevar a cabo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.1, se han determinado los sólidos totales presentes en el fango, así como su fracción suspendida y volátil. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.: Concentración de sólidos para el fango flotado en función del tiempo de sonicación.

Tiempo sonicación(s)	ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)
0	3858	1745	696	3162	1545	200
60	3681	1333	698	2983	1482	717,5
90	3612	1577	615	2997	1426	152

Las concentraciones de sólidos no varían significativamente tras aplicar la técnica de ultrasonidos. Aunque se produzca una solubilización de la fracción particulada de la materia orgánica, está va a seguir reflejándose en la volatilidad de la muestra. Estos datos corroboran el estudio realizado por

Benabdallah et al. (2006), en el que efectivamente los sólidos, tanto totales como volátiles, permanecen constantes durante la sonicación. De acuerdo a esto, se podría asumir que la técnica de ultrasonidos no da lugar a una mineralización y/o volatilización del fango.

- **DQO total y soluble**

Tras llevar a cabo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.2 se han obtenido los resultados que muestran la tabla 4.5.

Tabla 4.5.: Valores promedio de la DQO del fango flotado en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DQOpart(mg/L)	%solube	%particulado
0	47459	765	46694	1,6	98,4
60	49765	1084	48681	2,2	97,8
90	49847	1363	48484	2,7	97,3

Podemos observar que durante la sonicación se produce la solubilización de la fracción orgánica particulada del fango, dando lugar a un incremento de la fracción soluble de la DQO. Muy bajo en nuestro caso porque los tiempos de sonicación también son bajos. Este tipo de comportamiento ha sido también observado por otros autores (Zhan et al. (2007), Wang et al. (2006) y Hwang et al. (2005))

En este tipo de fango, la DQO total no padece un incremento considerable. Esto podría deberse a la composición del fango que estamos tratando. El fango flotado, es un fango compuesto principalmente por microorganismos y materia orgánica que le confieren un alto grado de volatilidad y que al sonicar, puede desintegrarse u oxidarse parte de esta materia, perdiendo una pequeña fracción volátil. De acuerdo a esto y sabiendo, que durante la sonicación parte de la fracción orgánica se transfiere a la fracción soluble, cabe esperar un aumento considerable de la fracción soluble de la DQO tal vez a mayores tiempos de sonicación.

- **DBO limite**

En este estudio se ha introducido el parámetro de DBO límite para conocer su evolución tras aplicar ultrasonidos al fango. Es un parámetro que en la mayoría de los estudios no se ha determinado, fundamentalmente debido a las dificultades experimentales que conlleva la aplicación del método analítico en muestras de fango, así como al alto error experimental. No obstante, se ha considerado oportuno introducirla, pues la DBO límite es indicativa de la biodegradabilidad del fango.

De acuerdo a esto y llevando a cabo el procedimiento experimental descrito en el punto 3.1.3 para la determinación de la DBO límite se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 4.6.

Tabla 4.6.: Valores promedio de DBO del fango flotado en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	DBOL(mg/L)
0	26635
60	30240
90	32165

A la vista de los resultados se puede deducir que la DBO límite total tiene un aumento considerable tras sonicar en este tipo de fango. Sería interesante analizar la DBO límite soluble para poder comparar y ver que fracción de la DBO es la que sufre mayor transformación. Y de este modo determinar si la técnica de ultrasonidos es realmente útil o no.

4.2.2. Fango mezcla

Los resultados de sólidos, DQO y DBO correspondiente al fango mezcla para los tiempos de sonicación del estudio se exponen y analizan a continuación.

- **Sólidos**

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.1, se han determinado los sólidos totales presentes en el fango, así como su fracción suspendida y volátil. Los resultados se reflejan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6.: Concentración de sólidos en el fango mezcla en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)
0	970	855	182	788	657	198
60	1041	910	357	684	708	202
90	946	758	298	648	577	180

En los resultados obtenidos se observa cómo la concentración de sólidos, tanto totales, como la fracción orgánica, no presentan una variación significativa tras haber aplicado la técnica de ultrasonidos. Este hecho puede ser debido a que, si bien, durante la sonicación puede producirse una solubilización de la fracción orgánica particulada, ésta va a seguir reflejándose en la volatilidad de la muestra.

• DQO total y soluble

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.1.2 se han obtenido los resultados que se reflejan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7.: Valores promedio de la DQO del fango flotado en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DQOpart(mg/L)	%soluble	%particulado
0	9962	377	9585	3,8	96,2
60	10840	423	10417	3,9	96,1
90	10903,7901	427	10477	3,9	96,1

Como ya se ha comentado, desde el punto de vista de la sonicación, interesa conocer la evolución de la fracción soluble de la DQO. De acuerdo a esto, puede observarse un incremento de esta fracción. Este hecho denota que durante la aplicación de ultrasonidos, parte de la fracción orgánica particulada se solubiliza, es decir, una porción de la fracción orgánica se disgrega pasando a la fracción soluble. Pero como se ha dicho anteriormente el tiempo de sonicación es tan bajo que no se pueden observar grandes cambios.

Por otra parte, también se advierte un incremento en la DQO total. Este aumento podría atribuirse a que durante la sonicación se generan compuestos que son fácilmente oxidables por los compuestos químicos empleados en la determinación de este parámetro, a partir de otros no oxidables en las condiciones iniciales.

- **DBO limite**

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.3, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8.: Valores promedio de DBO límite del fango mezcla en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	DBOL(mg/L)
0	5407
60	5667
90	5893

De los resultados mostrados se desprende que la DBO límite total se mantiene prácticamente constante, independientemente del tiempo que dure el proceso de sonicación.

Es un aumento no muy bien definido entre los distintos tiempos, pero si importante, en comparación con la DBO límite del fango antes de aplicarle ultrasonidos.

El hecho de que no haya un incremento bien definido y exista esa dispersión de los datos entre los tres tiempos, puede deberse, como apuntan diversos trabajos (UTN F.R. Mendoza), a que el método de DBO límite utilizado no es nada preciso en situaciones en las que se realizan grandes diluciones, como es el caso de este estudio.

La ausencia de otras metodologías alternativas para analizar este parámetro en muestras de fango, ha obligado a asumir éste. No obstante, sería necesario evaluar nuevas alternativas en la determinación de la DBO5 a efectos de reducir el error atribuible al método de análisis.

4.2.3. Fango digerido

Los resultados de sólidos, DQO y DBO correspondiente al fango digerido para los tiempos de sonicación del estudio se exponen y analizan a continuación.

- **Sólidos**

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.1, se han determinado los sólidos totales presentes en el fango, así como su fracción suspendida y volátil. Los resultados se reflejan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9.: Concentración de sólidos en el fango mezcla en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	ST(mg/L)	SS(mg/L)	STV(mg/L)	STNV(mg/L)	SSV(mg/L)	SSNV(mg/L)
0	1981	1403	339	1642	1328	1063
60	2074	1563	320	1754	995	568
90	2046	1497	336	1710	93	1404

En este tipo de fango la variación de sólidos totales entre los diferentes tiempos no supone una variación significativa. En cambio los sólidos volátiles disminuyen drásticamente, esto podría deberse a que parte de la fracción volátil tras sonicar se ha vuelto soluble aunque la fracción particulada no sufre ningún cambio significativo.

- **DQO total y soluble**

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.1.2 se han obtenido los resultados que se reflejan en la tabla 4.10.

Tabla 4.10.: Valores promedio de la DQO del fango flotado en función del tiempo de sonicado.

Tiempo sonicación(s)	DQOt(mg/L)	DQOs(mg/L)	DQOpart(mg/L)	%soluble	%particulado
0	30466	1824	28642	6,0	94,0
60	30539	1928	28611,3586	6,3	93,7
90	31069	1937	29131,51312	6,2	93,8

Tras sonicar este fango tanto la DQO total como la soluble sufren cambios, no demasiado significativos pero si podemos observar que la fracción soluble aumenta como consecuencia de la desintegración y disgregación del fango, producida durante la sonicación. Esta desintegración hace que una gran cantidad de compuestos susceptibles de ser oxidados en la DQO, se liberen, transfiriéndose a la fracción soluble parte de la fracción particulada.

Aunque cabe destacar que este tipo de fango al ser el más estable de todos, ya no contiene demasiadas especies químicas susceptibles a la oxidación, ya que todas las ellas han debido reaccionar en los procesos anteriores a la digestión anaerobia, en el reactor biológico.

- **DBO limite**

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.3, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.11.: Valores promedio de DBO límite del fango digerido en función del tiempo de sonicado

Tiempo sonicación(s)	DBOL(mg/L)
0	6140
60	6229
90	6490

Tras analizar los resultados obtenidos podemos observar que de igual manera que en el caso anterior la DBO límite total de este fango no sufre cambios significativos.

Al no disponer de datos de la DBO soluble no podemos deducir si los ultrasonidos realmente han vuelto más solubles los compuestos particulados, por tanto se necesitaría de dichos datos para poder extraer una conclusión demostrativa.

De todos modos se trata del fango digerido del que se deduce que es más o menos estable y debe tener una DBO baja ya que los microorganismos han desaparecido o son escasos.

4.3. Variación de la biodegradabilidad

En este apartado se va a llevar a cabo una comparación de los tres fangos, ya analizados previamente, para estudiar el efecto de la aplicación de ultrasonidos en la biodegradabilidad de

los mismos y establecer sobre qué tipo de fango esta aplicación sería más eficiente. Para ello, se ha establecido un parámetro que va a reflejar el grado de biodegradabilidad de dichos fangos. Este parámetro es el grado de solubilización, tanto de la DQO como de la DBO. Así mismo, se reflejará la velocidad de solubilización de los mismos.

A continuación se expondrán los resultados obtenidos de este parámetro así como la velocidad de solubilización antes mencionada.

4.3.1. Grado de solubilización

El grado de solubilización o solubilidad de una sustancia representa la transferencia de la materia orgánica particulada de la muestra de fango, a la fracción soluble de la misma, como consecuencia de la sonicación. Este parámetro puede ser analizado comparando las fracciones solubles y particuladas de la DQO o de la DBO, en este estudio nos centraremos en el grado de solubilización de la DQO.

- DQO:

La solubilización de la DQO representa la transferencia que se produce de DQO desde la fracción particulada del fango, a la fracción soluble del mismo.

El grado de solubilización la DQO (S_{DQO}) se expresa en función de la fracción soluble de la DQO y su cálculo se realiza mediante la expresión 4.1.

$$SDQO = \frac{DQOs - DQOso}{DQOp0} \times 100 \quad (\text{Ec.4.1.})$$

Donde:

DQOs. DQO soluble tras aplicar ultrasonidos (mgO_2 / L)

DQOs0. DQO soluble antes de aplicar ultrasonidos al fango (mgO_2 / L)

DQOp0. DQO particulada antes de aplicar ultrasonidos al fango (mgO_2 / L).

Los resultados que se van a exponer, relativos a este parámetro, son obtenidos tras aplicar la ecuación 4.1 en los tres tipos de fango.

Tabla 4.12.: Resumen resultados del grado de solubilidad

Tiempo	Grado de solubilidad(%)	
	60s	90s
Fango flotado	0,64101	1,20165
Fangomezcla	0,46175	0,50191
Fango digerido	0,34136	0,37091

En la gráfica siguientes se representa el grado de solubilización de cada tipo de fango en función del tiempo de sonicación pertinente:

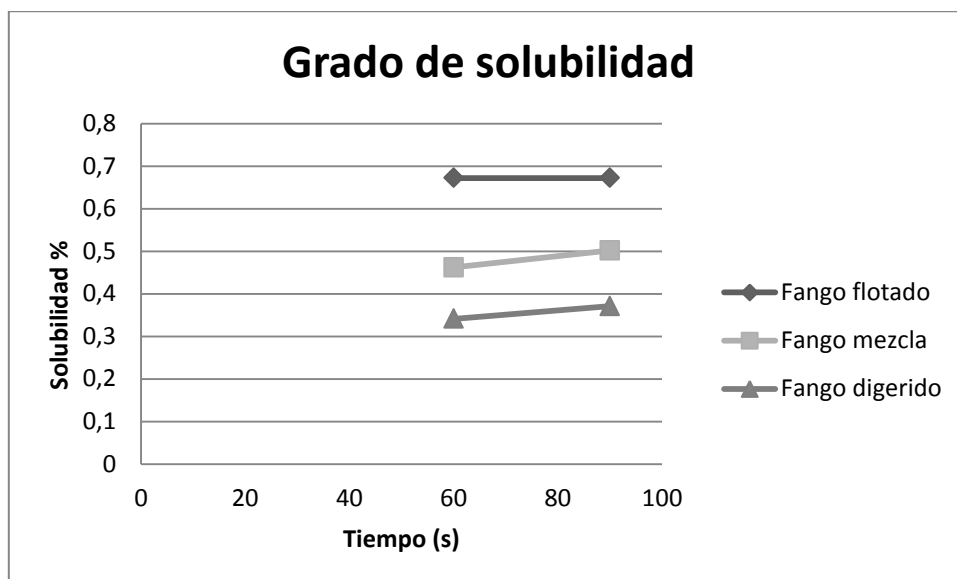


Figura 4.1.: Evolución del grado de solubilidad del fango flotado.

En los resultados se puede observar cómo en todos los fangos la S_{DQO} aumenta. Este aumento corrobora que durante la sonicación, parte de la fracción particulada de la materia orgánica se solubiliza, pasando a la fracción soluble.

Puesto que el grado de solubilidad es un indicativo de la biodegradabilidad del fango el fango, se podría deducir, que el fango que más aumenta su biodegradabilidad, tras aplicar ultrasonidos es el fango flotado, seguido del fango mezcla, siendo el fango digerido el que aumenta menos su S_{DQO} . Esto es lógico debido a que el fango que procede del espesador por flotación es el que contiene más materia orgánica y microorganismos por tanto se podría decir que las paredes celulares de los microorganismos tras la sonicación se solubilizan quedando como materia orgánica soluble fácilmente hidrolizable. Aun así, el resto de fangos también presenta un incremento notable de solubilización tras la aplicación de la técnica.

Por tanto, en base los estudios mostrados para este parámetro, una posibilidad de incorporación de la técnica a escala real, sería optar por una recirculación del fango flotado hacia el reactor biológico en la que se establecería la técnica de ultrasonidos como otro tratamiento de la línea de fango. De esta forma, y como se ha podido comprobar en los resultados, se mejoraría la biodegradabilidad del fango e incluso, podría mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia. O bien, actuar sobre el fango mezcla. Para discutir entre estas dos alternativas, sería necesario un análisis más detallado evaluando los aspectos económicos, relativos a cada uno de ellos.

4.3.1.1. Velocidad de solubilización de la DQO:

La velocidad de la DQO corresponde al incremento de la DQO en un intervalo de tiempo determinado. Esta se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_{sol}(t) = DQO / t \quad (\text{Ec.4.2.})$$

Tomando los valores correspondientes al porcentaje de la fracción soluble de la DQO de cada tipo de fango y para cada temperatura, se ha determinado la velocidad de solubilización aplicando la expresión 4.1.

Tabla 4.13.: Velocidad de solubilización de la DQO h^{-1}

Tiempo de sonicación (s)	Tipos de fango		
	Fango flotado	Fango mezcla	Fango digerido
60	72,10	30,11	22,25
90	25,64	18,47	13,65

Se observa como la velocidad de solubilización en los primeros 60 segundos presenta valores más elevados para los tres tipos de fango. No obstante, a medida que el proceso transcurre, los valores de velocidad de solubilización para los diferentes tipos de fango tienden a asemejarse. Para el fango flotado la velocidad es mucha más elevada que para el resto, esto

concuera con el aumento en el grado de solubilización de dicho fango. Es normal que el fango digerido no tenga una velocidad ni un grado de solubilización muy elevados, ya que se trata de un fango estable. Debería de estudiarse más a fondo si otros parámetros afectan a la velocidad, como por ejemplo podría ser la temperatura del fango.

4.3.2. Relación DBO/DQO (ratio)

La DBO límite no puede representar la carga contaminante total, ya que ciertos compuestos pueden ser difíciles de asimilar por los microorganismos utilizados o porque el tiempo de incubación ha sido insuficiente y no se ha podido producir la oxidación total. Es por esto, que toda expresión de DBO deba ir acompañada de la DQO. La comparación de ambos parámetros nos ayuda a comprender el grado de biodegradabilidad del fango. De acuerdo a esto, se denomina “ratio” a la relación existente entre la DBO y la DQO de una muestra de fango. Según esto, se establece que (Sing, 1971):

- $DBO/DQO = 0,5$. Denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad
- $DBO/DQO < 0,5$ Permite sospechar la presencia de sustancias tóxicas que retardan o inhiben la biodegradabilidad.

La tabla 4.14. muestra la relación DBO/DQO en los tres tipos de fangos en los diferentes tiempos de sonicación establecidos en este estudio.

Tabla 4.14.: Porcentaje de biodegradabilidad según tipo de fango y tiempo de sonicación.

Tiempo de sonicación (s)	Fango flotado	Fango mezcla	Fango digerido
0	0,535	0,496	0,186
60	0,607	0,523	0,259
90	0,678	0,592	0,496

A continuación se expone de forma gráfica la evolución de la biodegradabilidad de cada tipo de fango. Para poder entender de una forma más sencilla que sucede tras aplicar ultrasonidos en los mismos.

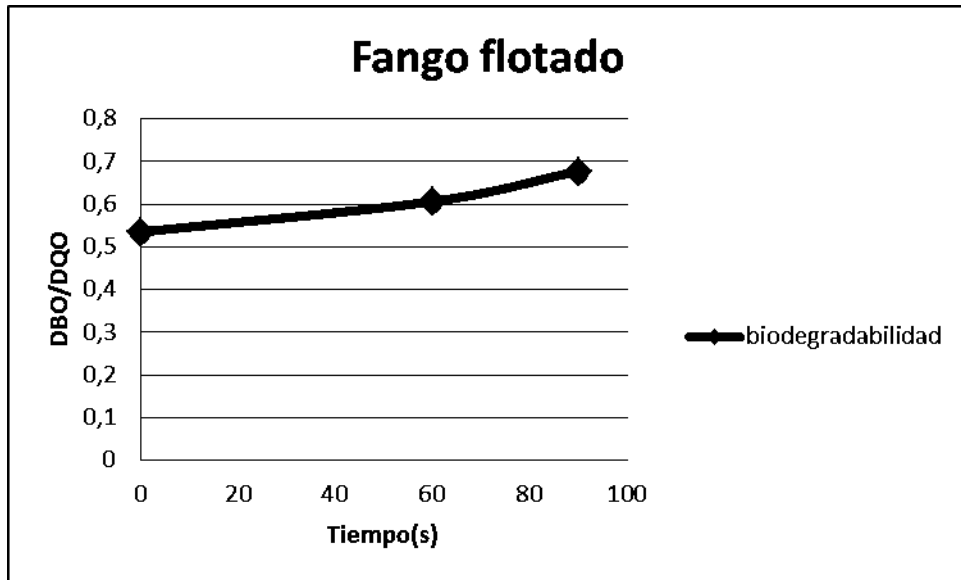


Figura 4.2.: Ratio para el fango flotado

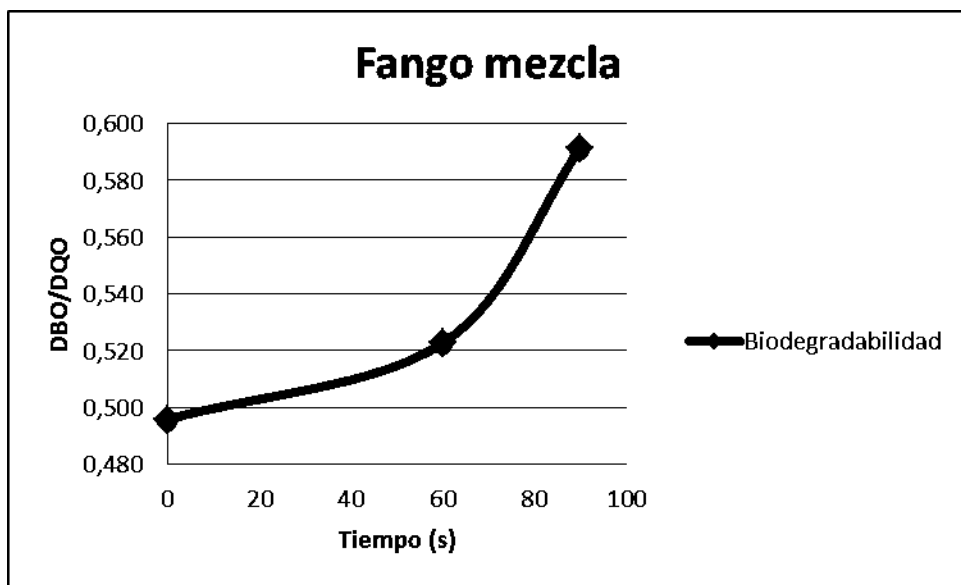


Figura 4.3.: Ratio para el fango mezcla

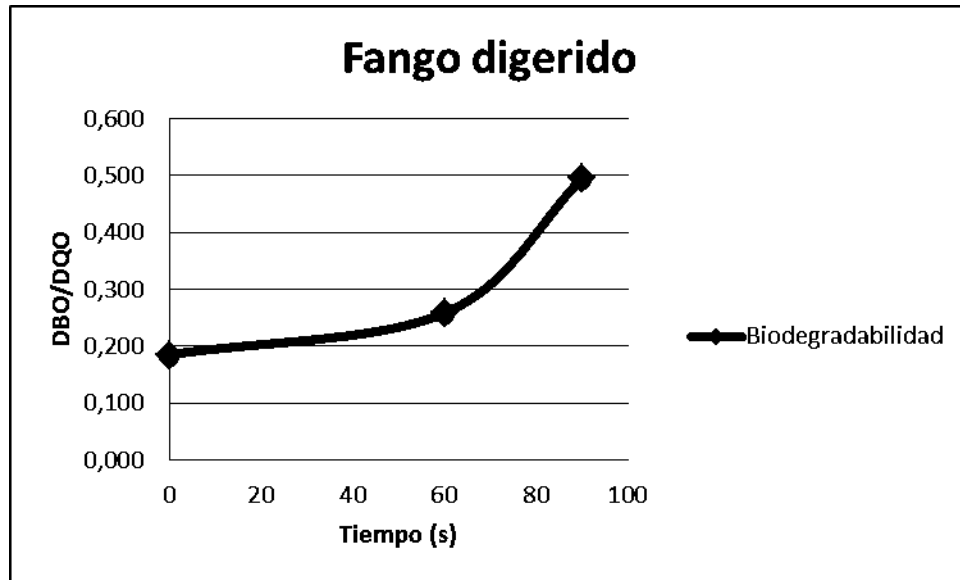


Figura 4.4.: Ratio para el fango digerido

Como se observa en los resultados mostrados en la tabla 4.14., el fango flotado y el fango digerido aumentan el ratio con el tiempo de sonicación. Aunque cabe destacar que el incremento de la ratio se ve realmente a partir de la segunda sonicación, es decir a partir de sonicar la muestra 90 segundos, los primeros segundos no implican un cambio notorio en la biodegradabilidad. Se podría decir que la relación tiempo de sonicación y biodegradabilidad tienden a un comportamiento exponencial aunque debería estudiarse a que tiempo se alcanza el equilibrio.

Por otra parte, y de acuerdo a lo establecido por Sing (1971), tanto el fango flotado como el fango mezcla, presentan valores de ratio cercanos al 0.5 por lo que podría decirse, que presentan un grado satisfactorio de biodegradabilidad.

4.4. Estudio comparativo de los distintos tipos de fango

Los tres tipos de fango tienen una naturaleza, aspecto y composición muy distinta, además provienen de etapas del tratamiento de aguas diferentes, asimismo cada fango sucede al siguiente, es decir, el fango flotado acabará formando parte del fango mezcla y a su vez esté del fango digerido, según avance el proceso de estabilización de fangos y el tratamiento de aguas residuales. Por tanto es difícil comparar de forma estricta un fango con los otros.

De todos modos para poder entender y analizar si el uso de ultrasonidos es una técnica ventajosa y rentable para el tratamiento de fangos debemos comparar los resultados obtenidos y a su vez razonar que tipo de fango sufre más cambios desde el punto de vista de la biodegradabilidad. Para ello volveremos a fijarnos en la DQO soluble y la DBO límite de cada uno de los fangos.

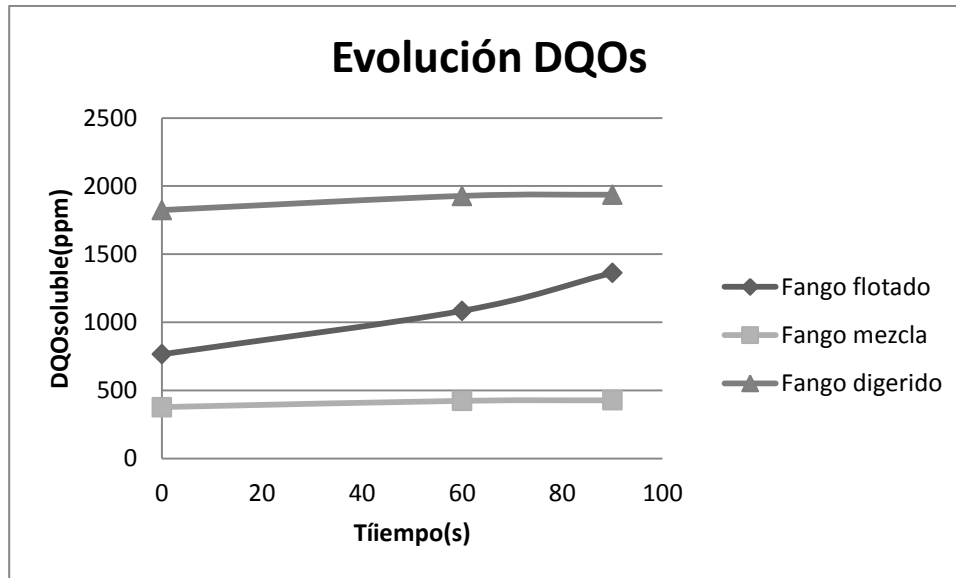


Gráfico 4.8.: Comparación de la DQO soluble en los distintos tipos de fango estudiados después de la sonicación.

Si estudiamos independientemente la variación de la Demanda Química de Oxígeno de la fracción soluble (DQOs) en cada uno de los fangos, claramente observamos como los ultrasonidos afectan en mayor medida al fango flotado. Tanto para el fango mezcla como para el digerido el cambio no es para nada significativo. El fango flotado al ser el más concentrado en microorganismos se supone

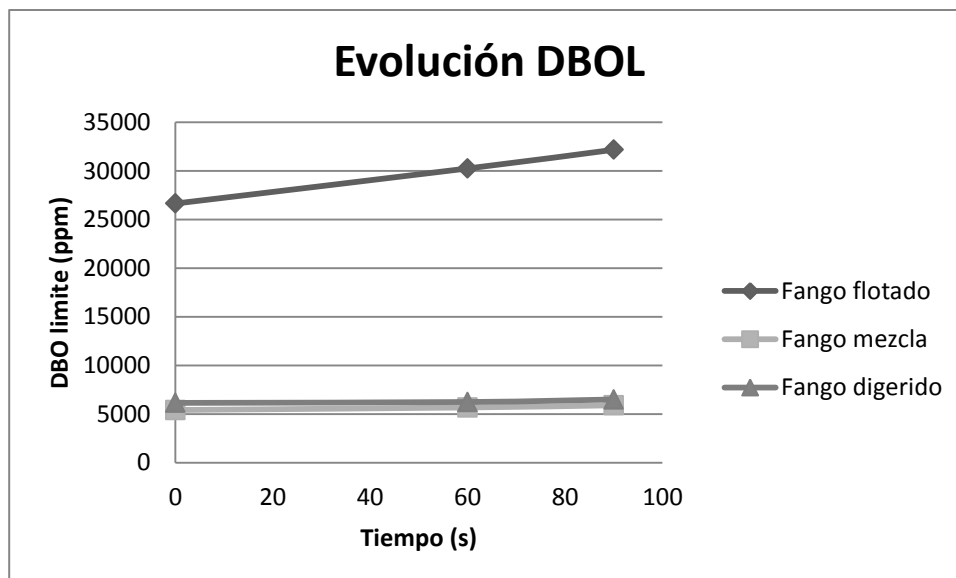


Gráfico 4.8.: Comparación de la DBO límite en los distintos tipos de fango después de la sonicación.

Si estudiamos el caso de la Demanda Biológica de Oxígeno límite (DBO_L) de la misma manera que en el caso anterior sí que se ve un incremento gradual en el valor en el caso del fango

flotado, para los otros dos fangos, mezcla y digerido el cambio es despreciable. Como se ha comentado anteriormente sería interesante conocer la Demanda Biológica de Oxígeno límite soluble, para conocer en exactitud que fracción de la misma sufre mayores cambios.

En ambos casos para el fango flotado sí que se aprecia un cambio considerable en los parámetros indicadores de la biodegradabilidad. Por tanto podríamos decir que sería adecuado tratar dicho fango con ultrasonidos para mejorar la disgregación de las partículas y mejorar su biodegradabilidad, pero cabría conocer con exactitud cuál sería el tiempo óptimo de sonicación y si otros parámetros físicos como el pH, la temperatura, etc., intervienen de alguna manera con el proceso.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos y mostrados en el apartado anterior se recogen las siguientes conclusiones:

-El tiempo de sonicación no ejerce una gran influencia en los sólidos del fango, en ninguno de los tres fangos estudiados, flotado, mezcla y digerido. Los sólidos se mantienen a lo largo del proceso alrededor del mismo valor en todas sus fracciones, totales, suspendidos y volátiles.

-La Demanda Química de Oxígeno (DQO) sí que sufre cambios tras la sonicación. Aunque tiene un comportamiento diferente para cada tipo de fango. Por una parte, en el fango flotado se puede observar un incremento en la DQO soluble pero en cambio la DQO particulada permanece más o menos estable. Para el fango mezcla ambas fracciones, soluble y particulada aumentan progresivamente acorde al tiempo de sonicación. Y por último en el caso del fango digerido también aumentan la fracción soluble y particulada de la DQO.

-En el caso de la Demanda Biológica de Oxígeno límite total (DBO_{LT}) en el fango flotado hay un incremento notable de la misma tras la sonicación. En el fango mezcla se ve un incremento progresivo de la DBO_{LT} frente al tiempo de sonicación, por tanto el cambio no es tan radical. Y de igual manera en el caso del fango digerido al aumentar el tiempo de sonicación aumenta la DBO_{LT} de manera progresiva sin sufrir cambios drásticos. Aunque debería estudiarse la fracción soluble de la DBO para poder comparar si realmente existe una solubilización importante.

-El grado de solubilización de la DQO solamente es importante para el caso del fango flotado donde sí que hemos podido observar un aumento contundente tras la sonicación. Aunque cabe destacar que la velocidad de solubilización sufre un incremento importante en los primeros 60 segundos, después tiende a estabilizarse. Debería estudiarse a otros tiempos de sonicación para poder conocer exactamente el comportamiento de la velocidad en este proceso.

-La relación entre la DBO/DQO (ratio o biodegradabilidad) experimenta un incremento respecto al tiempo de sonicación en todos los fangos estudiados. Para el fango flotado el incremento es más considerable y progresivo, el fango mezcla sufre cambios más graduales y en el caso del fango digerido empezamos a ver aumentos más interesantes a más tiempo de sonicación.

-En este estudio todos los ensayos se han realizado variando el tiempo de sonicación, a tiempos muy bajos y hemos podido observar cambios en la biodegradabilidad de todos los fangos aunque no demasiado importantes. Esto es positivo porque a tiempos bajos de sonicación se consigue modificar las características de los fangos y por tanto si se quisiera establecer el uso de ultrasonidos a la salida de los distintos tratamientos de fangos no conllevaría un consumo excesivo de energía ya que con solo un minuto de sonicación podríamos aumentar la biodegradabilidad de los fangos.

-Cabe destacar que en este ensayo no se ha variado la intensidad de sonicación ni parámetros físicos como la temperatura, pH, etc. Sería interesante conocer con mayor exactitud si modificando otros parámetros a parte del tiempo de sonicación el proceso mejora y si es realmente útil y rentable el uso de ultrasonidos en el tratamiento de los fangos.

-En resumen podríamos decir que el fango flotado es el que mejor se adapta a la sonicación y por tanto si tuviéramos que elegir en que parte del proceso de la línea de fangos establecer el sonicador sin duda sería tras el proceso de sedimentación por flotación del fango secundario, basándonos en este estudio en particular.

BIBLIOGRAFIA

6. BIBLIOGRAFIA:

- APHA-AWWA-WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, Diaz de Santos, 1992. ISBN: 84-7978-031-2.
- APHA, 2012 Standard method for the examination of water and wastewater. Washington: United States of America.
- BENABDALLAH EL-HADJ, T. et al. *Biodegradation of Organic Micropollutants in Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Digestión of Sewage sludge*.
Director, Joan Mata Álvarez. [Barcelona]: Univesidad de Barcelona, 2006.
- BOUGRIER, C. et al. *Solubilisation of wasteactivated sludge by ultrasonic treatment*. Chemical Engineering Journal 106 (2005) 163-169.
- BOUGRIER, C. et al. *Effect of ultrasonic, thermal and ozone pretreatments on waste Activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability*. Chemical Engineering and Processing 45 (2006) 711-718.
- DEWILL, R. et al. *Ultrasonic Treatment of waste Activated Sludge*. Wiley InterScienc e (2006) DOI 10.1002/ep.10130.
- EGAARD, H. Sludge minimization technologies: An overview. Water Science and Technology (2004). Vol 49 No 10 pp 31-40.
- FERRER POLO, J. et al. Tratamientos de aguas, Tomo 3: Tratamientos biológicos. Departamento de ingeniería hidráulica y Medio Ambiente, 1998. SPUPV –98.181.

- HWANG, E.J. Effects of chemical pretreatment on anaerobic digestion and fertilizer value. Department of Environmental Engineering. Daegu University.
- METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Traducido de la 3ª edición en inglés. Madrid: Mc Graw Hill/Interamericana de España, D.L.,1995. ISBN: 84-481-1607-0.
- PÉREZ-ELVIRA, S.I. et al. *Sludge minimization technologies*. Reviews in Environmental and Bio/Technology (2006) 5:375-398
- ROXBURGH, R. et al. *Sludge minimization technologies: Doing more to get less*. Water Environment Federation (WEF), 2006.
- SIERRAANTIÑOLO, J. et al. *La reutilización de las aguas residuales: Acondicionamiento y uso*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Gabinete de Formación y Documentación, 1989. ISBN: 84-7790-0183.
- THIEM,A.et al. *Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization*. PII: S0043-1354(00)00468-1. Water res. 35 (8) (2001) 2003-2009.
- VEGA, M. Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa: el problema de los lodos. DYNA: Enero-Febrero, 2005.
- VIÑÓ E. Estudio y Puesta en marcha de una Técnica de Tratamiento por Ultrasonidos para la mejora de la Biodegradabilidad Anaerobia del fango de la E.D.A.R Safor sur-Gandia. Directores: Juan Andrés González Romero; Jesús Mengual Cuquerella. [Valencia]: Escuela Politécnica Superior de Gandía, 2007.

- WANG, F. et al. Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration. *Journal of Hazardous Materials B123* (2005) 145-150.
- WANG, F. et al. Components of released liquid from ultrasonic waste activated sludge disintegration. *Ultrasonic Sonochemistry* 13 (2006) 334-338.
- ZHANG, P. et al. Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation. *Bioresource Technology* 98 (2007) 207-210.
- Vincenzo Naddeo a, Vincenzo Belgiorno a,1, Milena Landi a,2, Tiziano Zarra a,3, R.M.A. Napoli b,4. Effect of sonolysis on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Elsevier Desalination* 249 (2009) 762–767
- C. Bougrier a, C. Albasi b, J.P. Delgen`es a, H. Carr`ere a,* . Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability
- Huacheng Xu, Pinjing He, Guanghui Yu, Liming Shao. Effect of ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion and its sludge dewaterability. *Journal of Environmental Sciences* 2011.
- Serkan Sahinkaya a,* , Mehmet Faik Sevimli b. Synergistic effects of sono-alkaline pretreatment on anaerobic biodegradability of waste activated sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Available online 10 August 2012
- Evaluación de la Calidad Ambiental. Paches Giner, Maria Aguas Vivas. Apuntes Master de la Ingeniería Ambiental. Universidad Politècnica de València.
- Ferrer Polo, J, Seco Torrecillas, A. Tratamientos biológicos de aguas residuales. Universitat Politècnica de València 2007.
- Ferrer Polo, J, Seco Torrecillas, A. Tratamientos físicos y químicos de aguas residuales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. 2011. Ref-197.

- Cremades Rosado Inés. Efecto de la temperatura e intensidad de sonicación en la biodegradabilidad de los fangos de una E.D.A.R. TFC. Universitat Politècnica de València. Gandia 2008.
- Zarza Chocano Diana. Minimización de fango residual de E.D.A.R por ultrasonidos. Estudio comparativo de su aplicación a los distintos tipos de fango. TFC. Universitat Politècnica de València. Gandia 2008.

Páginas web:

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. [Consulta: 5 de agosto de 2013.] Disponible en:
<http://www.magrama.gob.es/ca/>
- Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient. [Consulta: 9 de agosto de 2013.] Disponible en:
<http://www.cma.gva.es/web/>
- Water treatments solutions, Lenntech. [Consulta: 13 de septiembre de 2013.] Disponible en:
<http://www.lenntech.es/tipo-de-lodos.htm>
- Tratamiento de lodos de depuradora, Universidad Carlos III de Madrid. [Consulta: 23 de septiembre de 2013.] Disponible en:
<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/>
- GAB Sistemática Analítica. [Consulta: 1 de octubre de 2013.] Disponible en:
<http://shop.gabsystem.com>
- Hielscher Ultrasonics technology. [Consulta: 1 de octubre de 2013.] Disponible en:
<http://www.hielscher.com>
- Wikibooks. Ingeniería de aguas residuales. [Consulta: 25 de octubre de 2013.]

Disponible en:

http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales