



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN  
BACTERIANA EN TERRENOS AGRÍCOLAS TRAS LA  
APLICACIÓN DE FANGOS DIGERIDOS EN LAS  
ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES  
URBANAS.

Autor

Javier Labadía Tolón

Director

Andrea López Martín

Ponente

Natividad Miguel Salcedo

*"Grado en Ciencias Ambientales"*

Octubre 2016

Escuela Politécnica Superior de Huesca



Me gustaría dar las gracias...

a Nati, por la oportunidad de hacer este proyecto por su disponibilidad total y su positividad.

a Andrea por solucionar todas mis dudas con claridad y precisión, y por estar siempre atenta a todos los detalles.

Gracias a mi familia y amig@s, por su ánimo y apoyo.

Gracias a todas las personas del laboratorio del Grupo de Investigación Calidad y Tratamiento de Aguas, por acogerme y ayudarme en todo lo que necesitaba.



## INDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
2.	ANTECEDENTES .....	4
2.1.	AGUAS RESIDUALES URBANAS .....	4
2.2.	ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR).....	6
2.2.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS EDARs .....	6
2.2.2.	EDAR OBJETO DE ESTUDIO.....	7
2.3.	NECESIDADES NUTRICIONALES DE CULTIVOS OBJETO DE ESTUDIO .....	12
2.4.	FANGOS DE EDAR.....	18
2.4.1.	MARCO LEGAL .....	18
2.4.2.	CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS FANGOS DE EDAR.....	22
2.4.3.	USOS PRINCIPALES DE LOS FANGOS .....	27
2.4.4.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE FANGOS DE EDAR EN AGRICULTURA.....	31
2.4.5.	SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE FANGOS DE DEPURADORA EN ESPAÑA ..	36
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	40
3.1.	DESCRIPCIÓN DE TERRENOS Y APLICACIÓN DE FANGOS .....	40
3.2.	TOMA DE MUESTRAS.....	43
3.2.1.	MUESTREO DE TERRENOS.....	45
3.2.2.	MUESTREO DE FANGOS .....	47
3.2.3.	MUESTREO DE AGUA .....	48
3.3.	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	49
3.3.1.	MUESTRAS DE TERRENOS .....	49
3.3.2.	MUESTRAS DE AGUA DE RIEGO .....	52
3.4.	ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	53
3.4.1.	PARÁMETROS ANALIZADOS .....	53
3.4.2.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE PARÁMETROS .....	55
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	63
4.1.	RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA DISOLUCIÓN MADRE DE MUESTRAS SÓLIDAS .....	63
4.2.	CONDICIONES INICIALES PREVIAS AL ABONO Y AL CULTIVO .....	64
4.3.	FANGOS DE DEPURADORA.....	68

4.4. AGUAS DE RIEGO.....	72
4.5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE PARÁMETROS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS.....	74
5. CONCLUSIONES.....	82
6. BIBLIOGRAFIA.....	85
ANEXOS.....	
I    DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICA.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
II   COMPOSICIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO EMPLEADOS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contaminantes relevantes en el tratamiento de aguas residuales urbanas. Fuente: (Cisneros Lainez, 2015) .....	5
Tabla 2. Caudal y carga de diseño de tratamiento en la planta. Fuente: Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas.....	7
Tabla 3. Características de la tecnología aplicada en el lecho bacteriano de la EDAR de Tudela. Fuente: nilsa.....	7
Tabla 4. Características del ATAD de la EDAR Tudela. Fuente. Elaboración propia.....	11
Tabla 5. Extracción y exportación real de nutrientes principales del maíz. Fuente: Canadian Fertilizer Institute (1998) .....	13
Tabla 6. Requerimientos de nutrientes del girasol. Fuente: Guía Práctica para la fertilización racional de cultivos en España .....	15
Tabla 7. Ventajas e inconvenientes del riego por goteo. Fuente Elaboración propia ...	16
Tabla 8. Limitaciones en el contenido de metales pesados para la utilización de fangos de depuración en el sector agrario de acuerdo con el RD 1310/1990 .....	20
Tabla 9. Parámetros legislados en el RD 1620/2007.....	21
Tabla 10. Propiedades físico-químicas y valores medios de los fangos. Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).....	26
Tabla 11. Evolución de la producción de fangos de depuración, desglosada por CCAA (2008-2012). Fuente: Registro Nacional de Fangos .....	36
Tabla 12. Destino final de los fangos generados en cada comunidad autónoma. Fuente Registro Nacional de Fangos (2012) .....	37
Tabla 13. Diferencias entre la textura predominante. fuente: elaboración propia.....	41
Tabla 14. Descripción de la frecuencia y tipos de muestras tomadas en cada jornada. fuente: elaboración propia.....	44
Tabla 15. Diferencias de los pesos seleccionados para la agitación. fuente: elaboración propia.....	50
Tabla 16. Parámetros analizados. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 17. Equipos de medida empleados para la medición de los parámetros microbiológicos. Fuente: Elaboración propia.....	55
Tabla 18. Tiempo de incubación y coloración característica. Fuente: Elaboración propia .....	59
Tabla 19. Metodología de análisis de parámetros físico-químicos. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 20. Metodología de medición parámetros agronómicos. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 21. Resultados de las diferentes formas de agitación MECÁNICA. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 22. Valor de los parámetros microbiológicos en las superficie de cultivo. Fuente: Elaboración propia.....	64

Tabla 23. Valor de parámetros físico-químicos en las superficies de cultivo. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 24. Valor de parámetros físico-químicos en los fangos aplicados. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 25. Valor de parámetros físico- químicos de los fangos aplicados. Fuente: Elaboración propia.....	69
Tabla 26. Comparación de los metales pesados de los fangos aplicados con los límites legales. Fuente: Elaboración propia .....	71
Tabla 27. Valor de parámetros microbiológicos en las aguas de riego. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 28. Comparación de la concentración de metales pesados analizados respecto a los límites establecidos en la legislación vigente. Fuente: Elaboración propia .....	80
Tabla 29. Comparación de metales pesados analizados en los fangos respecto al ANEXO iC DEL rd 1310/1990 . Fuente: Elaboración propia .....	81

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. diversos usos del agua. fuente: google imágenes .....	4
Figura 2. esquema de la edar de tudela. Fuente: Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas .....	8
Figura 3. Foto real del proceso de lecho bacteriano. Fuente: Elaboración propia .....	9
Figura 4. Etapas de la EDAR de Tudela. Fuente: Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas .....	11
Figura 5. Cultivo de maíz. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 6. Cultivo del girasol en la superficie arenosa. Fuente: Elaboración propia .....	16
Figura 7. Canal de Navarra. Fuente: Sistema Automático de Información Hidrológica. 17	
Figura 8. Fangos de salida de una Estación Depuradora de Aguas residuales. Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 9. <i>clostridium spp.</i> fuente: google imágenes.....	23
Figura 10. Coliformes totales. fuente: google imágenes.....	23
Figura 11. <i>Escherichia coli</i> . Fuente: Google Imágenes. ....	24
Figura 12. <i>salmonella spp.</i> fuente: google imágenes. ....	24
Figura 13. Huevo de Ascaris embrionado. Fuente: Google Imágenes. ....	25
Figura 14. Alternativas de la gestión de fangos en España. Fuente: Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento.....	28
Figura 15. Factores influyentes en fertilidad de un suelo. Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). ....	29
Figura 16. Rutas de contaminación MICROBIOLÓGICA SOBRE humanos. Fuente: Google Imágenes.....	32
Figura 17. Destino final de los fangos de EDARs. fuente: Plan integrado de gestión de residuos de Navarra para 2025. ....	38
Figura 18. Situación del cumplimiento del uso de los fangos EDAR. fuente: Plan integrado de gestión de residuos de Navarra para 2025.....	39
Figura 19. Visualización de los campos de cultivo. Fuente. Google Maps.....	40
Figura 20. Aperos para el acondicionamiento y preparación del terreno. Fuente: Google Imágenes .....	42
Figura 21. Muestreo de matriz sólida y los fangos. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 22. Superficie de cultivo del campo de maíz. fuente: elaboración propia.....	44
Figura 23. método de cuarteos. fuente. google imagenes .....	46
Figura 24. anaclín de Fango 2. Fuente: Elaboración propia .....	47
Figura 25. Muestreo de aguas de riego. Fuente: Google Imágenes.....	48
Figura 26. equipos de agitación. fuente: google imágenes.....	50
Figura 27. Preparación de las muestras madre. Fuente: Elaboración propia. ....	52
Figura 28. Medio de cultivo en polvo. fuente: elaboración propia.....	56
Figura 29. Procedimiento de diluciones en serie. Fuente: Organización Naciones Unidas para alimentación y agricultura.....	57

Figura 30. Siembra en superficie. Fuente: Elaboración propia .....	58
Figura 31. Filtración en membrana. Fuente: (Rodríguez Chueca, 2013).....	59
Figura 32. Recuento de <i>escherichia coli</i> en medio de Cultivo Maconkey. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 33. Concentración de parámetros microbiológicos en las superficies de cultivo. Fuente: Elaboración propia .....	65
Figura 34. Concentración de proteína en las superficies de cultivo. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 35. Concentración de fósforo y potasio asimilables en las superficies de cultivo. Fuente: Elaboración propia .....	67
Figura 36. Concentración inicial de parámetros microbiológicos en los fangos antes de abonar. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 37. Concentración de proteína bruta en los fangos antes de abonar. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 38. Concentración de fósforo y potasio asimilable en los fangos antes de abonar. fuente: elaboración propia .....	71
Figura 39. Concentración de parámetros microbiológicos en las aguas de riego. Fuente. Elaboración propia.....	73
Figura 40. Evolución de la concentración de parámetros microbiológicos en las superficies de cultivo tras la aplicación de fangos. Fuente. Elaboración propia .....	74
Figura 41. Evolución de la concentración de pH en las superficies de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia .....	75
Figura 42. Evolución temporal de la concentración de carbono orgánico disuelto en las superficies de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 43. Evolución temporal de la concentración de la conductividad en las superficies de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 44. Evolución temporal de la concentración de proteína bruta en las superficies de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia .....	78
Figura 45. Evolución de la concentración de fósforo asimilable en las superficie de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia .....	78
Figura 46. Evolución de la concentración de potasio asimilable en las superficie de cultivo tras la aplicación de los fangos. Fuente: Elaboración propia .....	79

## **MEMORIA**



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El agua es un recurso natural imprescindible a la vez que limitado. Por ello, el aumento de su demanda por parte del hombre, debido a diferentes motivos como el desarrollo urbano, avances tecnológicos y aumento en el uso de la energía, genera una contaminación que impide una aplicación directa para un uso determinado sin la modificación previa de algunos de sus parámetros, aspecto que induce a plantearse alternativas para maximizar los recursos hídricos (Alianza por el agua, 2008).

El vertido de efluentes contaminantes en cursos de aguas superficiales y subterráneas, en un volumen superior a la capacidad regenerativa de dichos cauces, está provocando graves problemas en el medio ambiente y la salud pública. Para resolver esta problemática, se ha dedicado una atención preferente a la implantación de sistemas de depuración, con el fin de aplicar una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que permitan reducir al máximo su nocividad para poder evacuar los efluentes al medio natural con una calidad adecuada.

En las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), se reproducen e intensifican de manera artificial y controlada, en poco espacio y breve tiempo, los mecanismos de autodepuración natural del río. Como consecuencia de los diferentes tratamientos que se realizan sobre las aguas residuales que entran en la instalación, se consigue una reducción de la carga de contaminantes del vertido, tanto de sólidos como de compuestos orgánicos (Gobierno de Aragón. Departamento de Medio Ambiente, 2009).

Durante el tratamiento de estas aguas residuales se generan los fangos de depuradoras. Las características de un fango varían ampliamente, en sus propiedades físicas y químicas, según el tratamiento al que haya sido sometido.

La composición de estos fangos, aunque variable, presenta por lo general un alto contenido en materia orgánica, macro y micronutrientes, convirtiéndolos en una fuente de elementos fertilizantes para su utilización agrícola. Sin embargo, es necesario analizar la composición de cada fango, las características del lugar de aplicación y limitaciones de manejo, para no causar contaminación ni posibles riesgos para el medio ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

Los fangos procedentes de EDARs tienen consideración de residuo y por tanto les es de aplicación el principio de jerarquía de residuos. Cabe mencionar la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y la utilización de los fangos de depuradora en agricultura, directiva transpuesta a la normativa española mediante el Real Decreto 1310/1990 por el que se regula la utilización de los fangos de

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

depuración en el sector agrario. Como desarrollo de dicho Real Decreto, posteriormente se sancionó la orden de 23 de octubre de 1993, sobre la utilización de fango en agricultura. Actualmente se encuentra derogada por la Orden AAA/1072/2013, sobre la utilización de fangos de depuración en el sector agrario.

Según esta orden, los contaminantes presentes en los fangos que presentan regulación son los metales pesados únicamente. Sin embargo, en los fangos se pueden encontrar otros contaminantes de naturaleza microbiológica, agronómica o físico-química que pueden causar alteraciones y daños considerables tras su aplicación en los cultivos agrícolas.

Por ello, el objetivo principal de este trabajo es analizar los efectos y evolución de las poblaciones microbianas derivadas de la utilización de enmiendas de fango de depuradora urbana en un suelo agrícola.

Para llevar a cabo el cumplimiento de este objetivo general se deberán desarrollar una serie de objetivos específicos, los cuáles se citan a continuación:

1. Estudiar la evolución y persistencia de algunos microorganismos patógenos en terrenos abonados con fangos digeridos de EDAR.
2. Estudiar la caracterización de parámetros físico- químicos en terrenos abonados con fangos digeridos de depuradoras.
3. Estudiar la evolución de la concentración microbiológica y de parámetros físico-químicos en la aplicación sobre dos cultivos diferentes como son maíz y girasol.
4. Estudiar la evolución de la concentración microbiológica y de parámetros físico-químicos sobre terrenos de diferente textura granulométrica.
5. Estudiar la contaminación microbiológica asociada al agua de riego.

La memoria de este trabajo se estructura de la siguiente manera:

1. Introducción y objetivos
2. Antecedentes
3. Procedimiento experimental
4. Resultados y discusión
5. Conclusiones
6. Bibliografía
7. Anexos

Tras el presente apartado de “Introducción y objetivos”, se presentan en el segundo punto los “Antecedentes”, donde se contextualiza el Trabajo Fin de Grado. Se tratan aspectos generales referentes a las aguas residuales urbanas, a los sistemas de depuración más comunes haciendo hincapié en aquellos utilizados en las instalaciones a estudiar y la legislación vigente referente a todo ello.

En el apartado “Procedimiento experimental”, se describen los instrumentos y procedimientos utilizados para la toma de muestras y su posterior caracterización físico-química y microbiológica.

A continuación, en “Resultados y Discusión”, quedan recogidos los valores de parámetros obtenidos del análisis de las muestras. Además, con el fin de analizar la influencia de los fangos EDARs en los terrenos, se realiza un estudio comparativo acerca de cómo afecta la aplicación de los fango en cada uno de los diferentes terrenos, así como la evolución temporal y la influencia de la composición del agua de riego en la contaminación presente. Por último, las “conclusiones” exponen de forma clara y concisa de las principales evidencias obtenidas tras la realización de este trabajo.

Además, la memoria se complementa con dos anexos. Uno recoge el desarrollo de la metodología analítica de parámetros físico-químicos y el otro recoge la composición de los medios de cultivo empleados en el análisis de parámetros microbiológicos en este trabajo.

El presente Trabajo Fin de de Grado se ha realizado en el Grupo de Investigación de “Calidad y Tratamiento de Aguas” perteneciente al Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza y al Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IU

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. AGUAS RESIDUALES URBANAS

El agua es elemento fundamental, fuente de toda vida, constituyendo parte integrante de todos los tejidos animales y vegetales, pero, además, es indispensable para toda una serie de usos humanos que proporcionan un mayor bienestar, desde la salud y la alimentación, hasta la industria y el esparcimiento (Cruz, 2008).

El aumento de su demanda por parte del hombre, debido a diferentes motivos como el desarrollo urbano, desarrollo de la sociedad, avances tecnológicos y aumento en el uso de la energía (Figura 1) provoca una contaminación de este recurso, alterando las características de las aguas e impidiendo una aplicación directa para un uso determinado sin la modificación previa de algunos de sus parámetros, aspecto que induce a plantearse diferentes alternativas con el fin de maximizar los recursos hídricos (Alianza por el agua, 2008).



FIGURA 1. DIVERSOS USOS DEL AGUA. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES

Se define agua residual como aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser rehusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (Organismo de evaluación y fiscalización ambiental, 2014).

Independientemente del origen y características de las aguas residuales urbanas, estas han de ser tratadas adecuadamente antes de su vertido o reutilización (Ramos Ridao, 2012).

Como se observa en la Tabla 1, la composición de contaminantes en estas aguas residuales es variada, por lo que se han de tratar estas aguas, con el fin de:

- Proteger el estado ecológico de los medios receptores del grueso de la contaminación orgánica procedente de las aguas residuales urbanas.
- Evitar riesgos para la salud pública de la población.
- Producir efluentes con características físicas, químicas y microbiológicas aptas para su reutilización.

## 2. ANTECEDENTES

TABLA 1. CONTAMINANTES RELEVANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. FUENTE:  
(CISNEROS LAINEZ, 2015)

CONTAMINANTES	PROPIEDADES
Sólidos en suspensión	Da lugar al desarrollo de depósito de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Se mide en función de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de la demanda química de oxígeno (DQO). Si se descargan aguas sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales y al desarrollo de condiciones sépticas.
Nutrientes	Pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada, y sí se vierten en cantidades excesivas pueden provocar contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos e inorgánicos determinados, definidos en base a su capacidad para producir cáncer, mutaciones o toxicidad. Suelen ser capaces de resistir los métodos convencionales de tratamiento.
Metales pesados	Son añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales.
Sólidos inorgánicos disueltos	Son añadidos al suministro del agua como consecuencia de su uso común. (Calcio, sodio, sulfatos...)
Patógenos	Los riesgos para la salud relacionados con el agua de consumo más comunes y extendidos son las enfermedades infecciosas ocasionadas por bacterias, virus y parásitos.

## 2.2. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)

### 2.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS EDARs

Los sistemas naturales tienen capacidad para modificar la composición del agua que reciben y eliminar contaminantes. Hasta hace pocos años, todos los vertidos de las ciudades desembocaban en las aguas corrientes de acequias, ríos y mares, dejando que los sistemas naturales degradaran con mayor o menor eficacia, los desechos de forma natural (Rueda Valdivia, 2009).

En la actualidad, debido al aumento de la población, del nivel de vida y a las actividades del hombre, el vertido de aguas residuales se ha incrementado, superando la capacidad de dilución y autodepuración de los cauces y medios receptores, lo que conlleva una alteración del equilibrio (Organización Meteorológica Mundial, 1997).

El cumplimiento de la Directiva 91/271/CE de 21 de mayo sobre tratamiento de aguas residuales conlleva que, desde el año 2005, todas las aglomeraciones urbanas mayores de 2.000 habitantes-equivalentes deberán contar con sistemas de depuración conformes a los límites de vertido en ella establecidos. Esta obligación, junto con la del incremento de la conciencia en la protección de los recursos hídricos, ha conllevado una fuerte inversión por parte de las Administraciones Públicas a todos los niveles (europeas, nacionales, autonómicas y locales) en el diseño, construcción y mantenimiento de estaciones depuradoras de aguas residuales.

En estas instalaciones se reproducen e intensifican de manera artificial y controlada, en poco terreno y breve tiempo, los mecanismos de autodepuración natural del río mediante la utilización de distintos tratamientos. Las aguas se ven desprovistas de materia en suspensión y orgánica, siendo su fin último velar por la salud pública y evitar las condiciones adversas provocadas por la descarga de agua residual al medio ambiente (Gobierno de Aragón. Departamento de Medio Ambiente, 2009).

Al depurar el agua, se generan una serie de residuos llamados fangos. Estos fangos están compuestos principalmente por el conjunto de materiales en suspensión del efluente, junto con los aditivos químicos empleados en el tratamiento de aguas y la masa bacteriana que participa en el proceso de depuración.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.2.2. EDAR OBJETO DE ESTUDIO

La EDAR objeto de estudio se corresponde con la propia del término municipal de Tudela. Ésta recibe aguas de origen doméstico e industrial, siendo el cauce receptor el río Ebro. La población censada es de 38970 habitantes y la carga tratada es de 82500 habitantes equivalentes (Gobierno de Navarra. Departamento de desarrollo rural y de Medio Ambiente, 2008).

En la Tabla 2 se muestran los datos de los caudales, tanto el de diseño como el tratado y la carga tanto de diseño como de tratamiento de la planta.

TABLA 2. CAUDAL Y CARGA DE DISEÑO DE TRATAMIENTO EN LA PLANTA. FUENTE: GRUPO DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE AGUAS

<b>Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/día)</b>	22000
<b>Caudal tratado (m<sup>3</sup>/día)</b>	20000
<b>Carga de diseño (DBO<sub>5</sub>/día)</b>	6900
<b>Carga tratamiento (DBO<sub>5</sub>/día)</b>	5200

En la Tabla 3 se muestra los datos de los rendimientos de eliminación en la EDAR de Tudela para la materia en suspensión (MES), como para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), como para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) que se presentan en la página web de la empresa que los gestiona.

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA APLICADA EN EL LECHO BACTERIANO DE LA EDAR DE TUDELA. FUENTE: NILSA

	<b>MES (mg/L)</b>	<b>DQO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L)</b>
Entrada	22.150	6879	244
Salida	19997	5219	14
Rendimiento (%)	93,55	88,49	94,26

## LÍNEA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE EDAR DE TUDELA

En la Figura 2 se representa un esquema de los procesos que se llevan a cabo en la línea de aguas de la EDAR objeto de estudio.

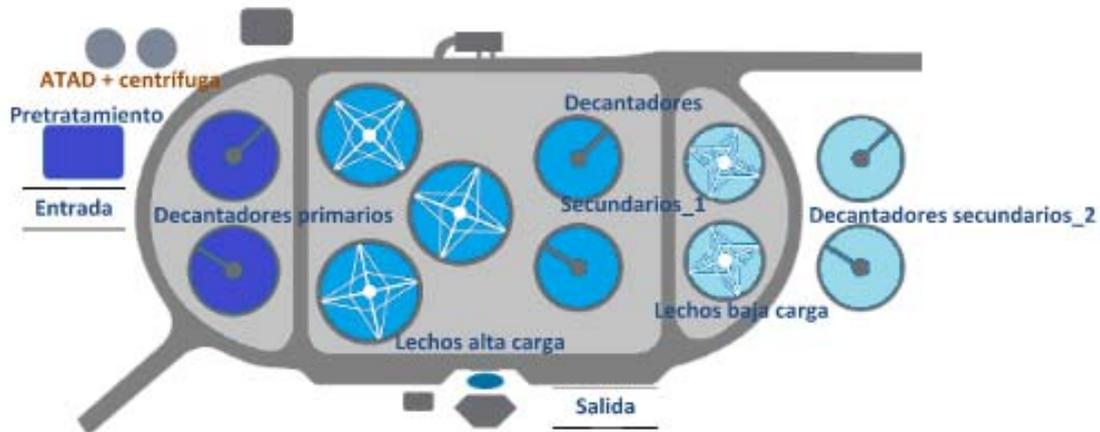


FIGURA 2. ESQUEMA DE LA EDAR DE TUDELA. FUENTE: GRUPO DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE AGUAS

Los procesos de tratamiento presentes en la línea de aguas de la EDAR de Tudela y sus objetivos son (Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas, 2016):

1. Bombeo de entrada del agua a la planta desde cierta altura para su circulación por gravedad a lo largo de la instalación.
2. Pre-tratamiento. Se pretende eliminar los constituyentes gruesos de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos y operaciones.
  - a. Desbaste y tamizado. Constan de rejas y tamices de diferentes calibres que separan los sólidos de tamaño grande y mediano.
  - b. Desarenado y desengrasado. El desarenado separa gravas, minerales y otras partículas voluminosas en suspensión, mientras que el desengrasado elimina las grasas, espumas y materiales flotantes.
3. Decantación primaria. Se pretende eliminar una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica con el fin de obtener un acondicionamiento previo del agua antes de su entrada en el tratamiento secundario. Se realiza en tanques en los que el agua fluye muy despacio. Aquí sedimentan por gravedad los sólidos en suspensión. Las materias decantadas constituyen los fangos primarios.

## 2. ANTECEDENTES

4. Tratamiento biológico. En la EDAR objeto de estudio, se realiza el tratamiento biológico mediante filtros percoladores en doble etapa, uno de alta carga y otro de baja carga. En ambos crecen colonias de microorganismos que se alimentan de la materia orgánica presente en las aguas, disminuyendo su contaminación. Se hace caer el agua a tratar, previamente decantada, en forma de lluvia, sobre una masa de material de gran superficie específica que sirve de soporte a los microorganismos. La materia orgánica y sustancias contaminantes del agua son degradadas por los microorganismos que se desarrollan alrededor de los elementos constitutivos de la masa porosa. Cuando los microorganismos se desarrollan, el espesor de dicha película aumenta hasta el punto en que el oxígeno no llega hasta las capas inferiores de la biomasa, la cual perece. Esto provoca que la masa biológica pierda su capacidad de adherencia y sea arrastrada por el líquido.

En la Figura 3 se muestran las imágenes de los lechos bacterianos de la EDAR de Tudela.



FIGURA 3. FOTO REAL DEL PROCESO DE LECHO BACTERIANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5. Decantación secundaria. La finalidad de esta etapa es eliminar sólidos en suspensión y compuestos orgánicos biodegradables. Al igual que ocurre para el tratamiento biológico, la decantación secundaria también es realizada en doble etapa, una tras los filtros de alta carga y otra tras los filtros de baja carga. En ellas el agua es sometida a una sedimentación o clarificadores para dejar el agua lo más limpia posible. En esta etapa se forman los fangos secundarios.

### **LÍNEA DE TRATAMIENTO DE FANGOS DE LA EDAR DE TUDELA**

Los fangos se obtienen en dos puntos del proceso, siendo fangos primarios y secundarios. Mientras los fangos primarios son aquellos producidos en el tratamiento primario, los secundarios son aquellos que provienen de la decantación secundaria. Una vez se han separado los fangos de las aguas depuradas, se reciclan los fangos secundarios y se retiran los fangos del decantador primario para someterlos a un tratamiento mediante el cual se estabilizan.

Dentro de los tratamientos empleados para estabilizar los fangos, el usado en la EDAR objeto de estudio es la Digestión Aerobia Termófila Autosostenida (ATAD). Se trata de un tratamiento biológico de estabilización e higienización de fango de depuradora, incluido como sistema de tratamiento avanzado según la propuesta de Directiva Europea, cuyo producto es un biosólido, siempre que se trabaje en determinadas condiciones de temperatura, tiempo de retención y tiempo de operación (García Ganuza et al., 2010).

Tanto la velocidad de crecimiento de la biomasa bacteriana, como el calentamiento del digestor influyen en la velocidad de eliminación de materia orgánica en el digestor, la cual, a su vez, va a estar limitada por la falta de oxígeno en el proceso o porque se agote el sustrato en la fase de calentamiento del digestor (Gómez Muñoz et al., 2010).

Las reacciones biológicas que tienen lugar en el proceso de digestión aerobia son:

- En primer lugar, la materia orgánica particulada presente en el fango de alimentación es solubilizada por un cambio brusco de temperatura o hidrolizada por la acción de enzimas segregadas por las bacterias heterótrofas.
- En la fase de crecimiento de las bacterias heterótrofas, la materia orgánica soluble generada es utilizada como sustrato y como fuente de energía teniendo lugar un proceso de oxidación exotérmico de dicha materia. La velocidad a la que se degrada la materia orgánica en condiciones aeróbicas se va ralentizando cuando la concentración de oxígeno disuelto no es suficiente.

Para que el sistema se encuentre en las condiciones idóneas es necesario que se trabaje con sustrato en exceso, es decir, que siempre exista sustrato fácilmente biodegradable de modo que nunca sea éste el que limite la cinética del crecimiento bacteriano.

Cuando se opera en condiciones aerobias termófilas, es habitual que el fango tratado no alcance un alto grado de estabilización, que la concentración de materia orgánica filtrada sea muy elevada y se obtengan bajos rendimientos de eliminación de materia orgánica (Gómez Muñoz et al., 2010).

## 2. ANTECEDENTES

Existe una reducción de población bacteriana debido a la lisis que sufre la misma. Como las bacterias no son completamente biodegradables, una fracción de las mismas permanece como residuo inerte y el resto pasa a ser materia orgánica biodegradable (Añon, 2012).

En la Tabla 4 se describen las condiciones de operación de la ATAD de la EDAR de Tudela, donde se muestra el volumen tratado, el tiempo de retención empleado, así como el caudal tratado.

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DEL ATAD DE LA EDAR TUDELA. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA

Tiempo de retención	5 días
Caudal tratado	70 m <sup>3</sup> /día

En la Figura 4 se muestra un esquema de funcionamiento de la planta depuradora de aguas residuales, donde se ve el ciclo completo de tratamientos tanto de fangos como de aguas que se lleva a cabo.

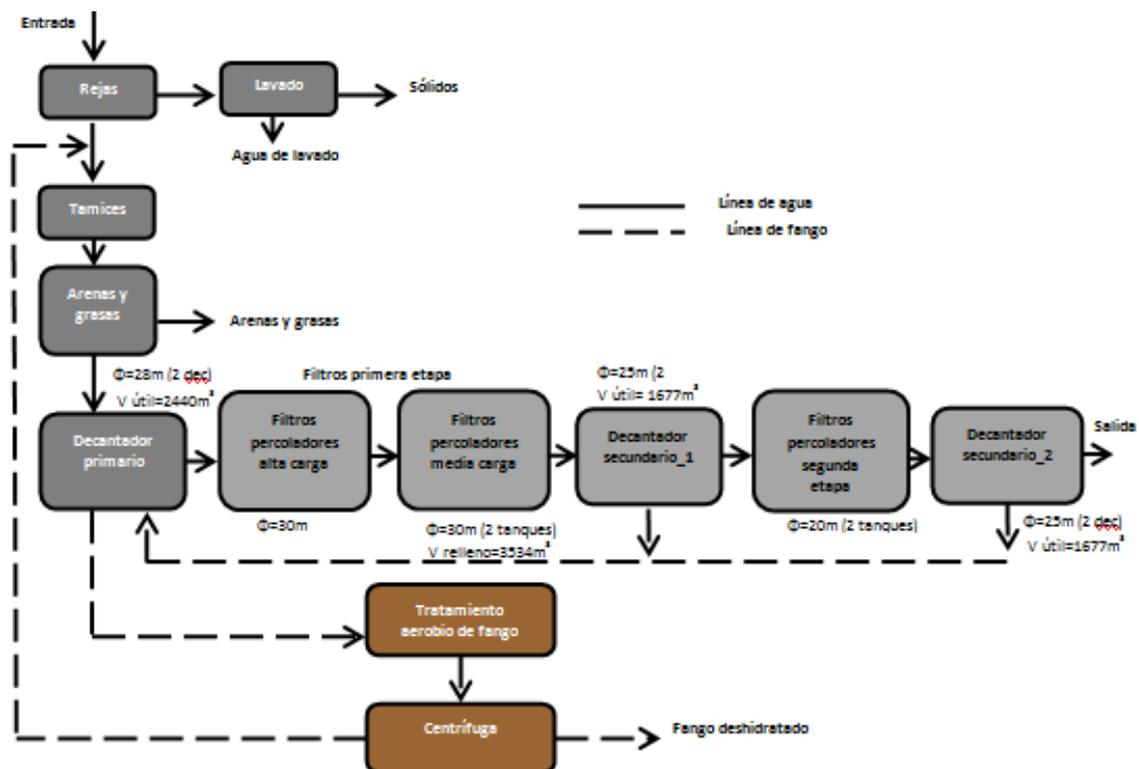


FIGURA 4. ETAPAS DE LA EDAR DE TUDELA. FUENTE: GRUPO DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE AGUAS

### 2.3. NECESIDADES NUTRICIONALES DE CULTIVOS OBJETO DE ESTUDIO

En el presente trabajo, las variedades vegetales que se han cultivado son maíz y girasol. A continuación se detallan los requerimientos nutricionales e hídricos de cada una de las variedades.

#### **MAÍZ (*Zea mays*)**

Es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial. La producción de cereales, y en particular del maíz, se ha visto incrementada durante el siglo XX por la mejora genética y la fertilización (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

Es un cereal que se adapta ampliamente a diversas condiciones, pero a su vez es muy exigente en cuanto a la fertilización física del suelo. Entre las características físicas más importantes, desde el punto de vista del maíz se encuentran (Instituto Nacional de Innovación y transferencia agropecuaria, 2009):

- Capacidad de retención de agua. Fundamental para asegurar un suministro continuo entre riegos.
- Sensibilidad a la salinidad del suelo. Una concentración salina, expresada como conductividad eléctrica en extracto de pasta saturada, superior a 1,7 dS/m a 20 °C comienza a afectar al cultivo.
- Aireación. El maíz es muy sensible a la asfixia radicular, no soporta los suelos apelmazados o con más drenaje.
- Temperatura. Respecto a la temperatura el maíz se muestra especialmente sensible durante la germinación, nascencia e inicio de la vegetación. Requiere un mínimo de 12°C de temperatura del suelo para la germinación.

Por otro lado, presenta un coeficiente hídrico muy bajo, (aproximadamente 300 kg de agua por un kg de sustancia seca producida) pero debe satisfacer perfectamente las exigencias hídricas en el período incluido entre la emisión del penacho hasta la maduración lácteo-cerosa, por un total de 50-60 días, por lo que el riego asume un papel determinante para la productividad del cultivo. Como promedio el consumo hídrico se considera en unos 5000-6000 m<sup>3</sup>/ha para el desarrollo de todo el ciclo de cultivo alcanzando elevados niveles productivos. Naturalmente estos valores son variables según la disponibilidad hídrica del terreno, el curso climático y la técnica de cultivo.

## 2. ANTECEDENTES

En la Figura 5, se muestra una imagen real del cultivo de maíz utilizado en este estudio, en el mes de Septiembre, viéndose como ya presenta un alto grado de madurez.



FIGURA 5. CULTIVO DE MAÍZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Hay que destacar el hecho de que una parte importante de los nutrientes extraídos son destinados a partes de la planta que no siempre se retiran del campo. Esto hace que existan importantes diferencias entre la extracción total de nutrientes y la exportación en los granos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los intervalos de los principales nutrientes que consume el maíz por tonelada de grano producido, así como de los principales oligoelementos presentes en el suelo y que condicionan su crecimiento (Laborda Larrodé, 2013).

TABLA 5. EXTRACCIÓN Y EXPORTACIÓN REAL DE NUTRIENTES PRINCIPALES DEL MAÍZ. FUENTE: CANADIAN FERTILIZER INSTITUTE (1998)

<b>NUTRIENTES</b>	<b>EXPORTACIÓN EN GRANO (KG/TN GRANO)</b>	<b>EXTRACCIÓN TOTAL (KG/TN GRANO)</b>
Nitrógeno	15,5-19,1	24,7-30,0
Fósforo	7,0-12,3	10,2-12,3
Potasio	4,5-5,4	20,7-25,2

**GIRASOL (*Helianthus annuus*)**

Se trata de una planta de gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y edáficas. Su crecimiento es regulado por la disponibilidad de agua y nutrientes, además de otros factores como temperatura y radiación a lo largo del ciclo (Organización de las Naciones unidas para la alimentación y agricultura., 2013). Además:

- Las temperaturas altas favorecen el cuajado y maduración de los frutos
- Es un cultivo que puede desarrollarse con buenos rendimientos en condiciones de secano, siempre que las precipitaciones anuales superen los 400 mm y no se concentren en invierno, ya que aprovecha el agua de forma eficiente en condiciones de escasez, debido a que su sistema radicular permite extraer agua del suelo a una profundidad a la que otras especies no pueden.
- El cultivo antecesor, las labranzas y los barbechos condicionan el almacenaje de agua en el suelo y resultan de gran importancia por la estrecha vinculación entre la disponibilidad de agua a la siembra y el rendimiento.
- Responde bien al riego, incrementando su rendimiento final, siendo las necesidades totales en general entre 3000-4000 m<sup>3</sup>/ha, dependiendo de zonas y clima.
- Requiere poca agua y hasta unos diez días después de la aparición del capítulo y las necesidades hídricas aumentan considerablemente y se mantienen hasta unos 25-30 días después de la floración.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los intervalos de los principales nutrientes que consume el girasol por tonelada de grano producido (Laborda Larrodé, 2013).

## 2. ANTECEDENTES

TABLA 6. REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES DEL GIRASOL. FUENTE: GUÍA PRÁCTICA PARA LA FERTILIZACIÓN RACIONAL DE CULTIVOS EN ESPAÑA

NUTRIENTES	GRANOS (KG/ TN GRANO)	RASTROJOS (KG/ TN GRANO)	TOTAL (KG/ TN GRANO)
Nitrógeno	26	15	41
Fosforo	4	1	5
Potasio	6	23	29
Calcio	1	17	18
Magnesio	2	9	11
Azufre	2	3	5
Boro	0,02	0,05	0,07
Cobre	0,01	0,01	0,02
Hierro	0,03	0,23	0,26
Manganeso	0,02	0,04	0,06
Molibdeno	0,01	0,02	0,03
Zinc	0,05	0,05	0,1

Además de nitrógeno, fósforo y potasio, los cultivos necesitan también sales, que se encuentran disponibles en el agua de riego con cierta facilidad, y muchas de las cuales son nutrientes. Algún ejemplo de estas son el sodio, calcio, hierro... (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2002)

En la Figura 6 se observa el campo de girasol sembrado utilizado en este estudio, la foto está tomada con fecha del mes de Septiembre, donde ya ha alcanzado la madurez plena y apenas quedan pocos días para su cosecha.



FIGURA 6. CULTIVO DEL GIRASOL EN LA SUPERFICIE ARENOSA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### **RIEGO DE LOS TERRENOS**

Como ya se ha comentado, el riego es un factor determinante para estos cultivos. En España, el riego por aspersión sigue siendo en uno de los sistemas de riego a presión más importantes. Por tanto, este sistema (Tabla 7) juega un papel cuantitativo muy importante dentro del sector agrícola nacional y de ahí que sea necesario tener información fiable sobre el funcionamiento de los aspersores, que son los responsables de distribuir el agua con uniformidad en el terreno.

TABLA 7. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RIEGO POR GOTEO. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Solo está limitado por condiciones atmosféricas	Lavado de productos fitosanitarios
Puede adaptarse la dosis de riego y rotación de cultivos	Problemas con los vientos
Se adapta a topologías diferentes	Alto coste económico de implantación y mantenimiento
Ahorro de mano de obra	Problemas salinidad en parte aérea del cultivo al usar aguas salinas

La calidad del agua y su adecuación para el riego se determinan por la importancia de los problemas que puedan aparecer en el sistema agua - suelo - planta después de un uso prolongado. Los riesgos más comunes, según los cuales se evalúan los efectos de la calidad del agua, son los relacionados con:

- La salinidad
- La infiltración y escorrentía y la pérdida de evaporación del agua.
- La toxicidad de iones específicos

## 2. ANTECEDENTES

En concreto, las aguas de riego provienen del Canal de Navarra. Este nace en el Embalse de Itoiz, sobre el río Irati, al norte de la cuenca de Pamplona y recorre gran parte del territorio de la Comunidad Foral para llevar agua a terrenos demandantes de la zona medio y sur de Navarra. Para ello se cuenta con una concesión de  $416 \text{ Hm}^3$  de agua procedente del embalse de Itoiz (Conasa, 2016).

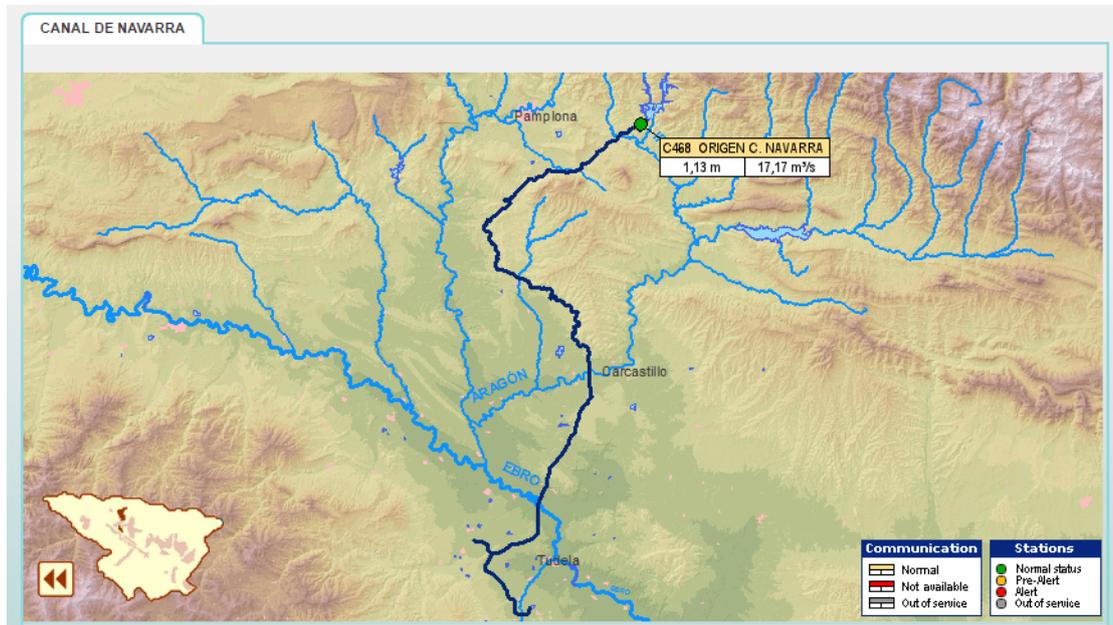


FIGURA 7. CANAL DE NAVARRA. FUENTE: SISTEMA AUTOMÁTICO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA.

El canal fue diseñado con una capacidad de transporte de  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  en el origen, reduciéndose a medida que van atendiéndose las demandas. Presenta una longitud total de 198 Km. En la actualidad se ha transformado en regadío 22.363 Hectáreas.

## 2.4. FANGOS DE EDAR

### 2.4.1. MARCO LEGAL

Las tecnologías específicas de tratamiento, que reducen los efectos contaminantes de las aguas residuales y, por tanto, solucionan una inquietante problemática, producen a su vez un residuo no menos problemático denominado fangos de depuradora, cuya eliminación constituye un problema acuciante (Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas, 2016).

Tal y como se comenta en el Real Decreto 1310/1990, la importancia de la producción de fangos, procedentes de la depuración de aguas residuales está planteando serios problemas para su almacenamiento y eliminación.

Es por ello preciso señalar, que la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y que regula de un modo genérico la gestión de los residuos, contempla dentro de la definición de residuo a todos aquellos que figuran en el antiguo Catálogo Europeo de Residuos (C.E.R.) que actualmente constituye la Lista Europea de Residuos (L.E.R.) en función de la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. En el caso concreto de los fangos de EDAR, se encuentran contemplados en dicha lista e incluidos en diferentes subapartados del código 19, bajo la denominación general de “residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano o agua para uso industrial”. Concretamente, los residuos procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales se podrían incluir, en función de los tratamientos en:

- *19 08: Residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales no especificadas en otra categoría.*
- 190805 definido como “fangos del tratamiento de aguas residuales urbanas”

Los fangos, los cuales presentan un aspecto como el que se muestra en la Figura 8, pueden ser sometidos a operaciones preliminares, conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, y en la normativa específica aplicable a cada tipo de tratamiento, como procesos de deshidratación, así como a tratamientos intermedios como digestión anaerobia, compostaje, etc., de modo que se asegure un destino final medioambientalmente seguro.

## 2. ANTECEDENTES



FIGURA 8. FANGOS DE SALIDA DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El objetivo que señala el Plan Nacional de Fangos de Depuradora de Aguas Residuales (2001-2006), es prevenir la generación de fangos en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda reutilizar y valorizar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar.

Con respecto a la aplicación de estos fangos a la agricultura la Directiva 86/278/CEE de 12 de Junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos para la utilización de los fangos de depuradora en agricultura se establecen entre otros los siguientes requisitos en función del uso, límites...:

- Nivel de tratamiento de los fangos.
- Frecuencia de controles de calidad de los fangos y suelos.
- Contenido máximo de metales pesados en fangos.
- Contenido máximo de metales pesados en suelos.
- Cantidades máximas de fango aplicables al suelo por hectárea y en año en función del contenido de metales pesados de los fangos.
- Plazos de aplicación de fangos en distintos cultivos y aprovechamiento.

Esta directiva se incorpora a través del Real Decreto 1310/1990 de 29 de octubre de 1990, el cual regula las condiciones en que podrán ser aplicados fangos de depuradora a los suelos agrícolas, condiciones tendentes a la protección del posible efecto nocivo sobre las aguas, el suelo, la vegetación, los animales y el propio ser humano. El fin de esta disposición es establecer un marco normativo que permita compaginar la producción de los fangos de depuración y su utilización agraria en España, así como, la protección eficaz de los factores físicos y bióticos afectados por el proceso de producción agraria.

## 2. ANTECEDENTES

Con esta finalidad y de conformidad con lo dispuesto en artículo 4º del Real Decreto 1310/1990, se concreta en el anexo II la información que debe acompañar a toda partida de fangos de depuración destinada a la actividad agraria y se actualiza la información que debe contener el Registro Nacional de Lodos, que debe incluir toda la información relativa a las instalaciones depuradoras y de tratamiento, los gestores y los campos utilizados.

El artículo 3º donde establece los valores límites de concentración de elementos de los suelos y de los fangos, tal y como se observan en la Tabla 8, así como en algunos casos su prohibición de utilización. También se establecen los parámetros de análisis y control que se deben efectuar a los fangos por parte de las depuradoras y ser controlados por las administraciones competentes, además de todos los tipos de formularios e información de la que deben ir acompañados los fangos en todo momento.

TABLA 8. LIMITACIONES EN EL CONTENIDO DE METALES PESADOS PARA LA UTILIZACIÓN DE FANGOS DE DEPURACIÓN EN EL SECTOR AGRARIO DE ACUERDO CON EL RD 1310/1990

Metales	Límites actuales vigentes (Real Decreto 1310/1990)				Introducción en el suelo (kg/ha/año)
	Suelo <sup>(1)</sup> (mg/kg ms)		Lodo (mg/kg ms)		
	pH<7 (suelo)	pH>7 (suelo)	pH<7 (suelo)	pH>7 (suelo)	
Cd	1	3	20	40	0,15
Cu	50	210	1.000	1.750	12
Ni	30	112	300	400	3
Pb	50	300	750	1.200	15
Zn	150	450	2.500	4.000	30
Hg	1	1,5	16	25	0,10
Cr	100	150	1.000	1.500	3

La Orden AAA/1072/2013 de 7 de junio, sobre utilización de fangos de depuración en el sector agrario, establece una serie de requisitos que las propias EDARs han de documentar, como son:

- Obligatoriedad del suministro de información de la estación depuradora al inicio de su funcionamiento.
- Envío de una ficha semanal a la autoridad competente, de forma que permita controlar las cantidades de fangos procedentes de EDAR destinados a fines agronómicos

Si los fangos de depuradora se aplican a zonas vulnerables, se debe cumplir de manera complementaria la Directiva 91/676/CEE, traspuesta al derecho interno a través del Real Decreto 261/1996, de 16 febrero, que controla la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias, estableciendo limitaciones en las cantidades de nitrógeno orgánico anuales.

## 2. ANTECEDENTES

En España no existe ninguna legislación que indique valores máximos admitidos de microorganismos patógenos en los fangos de depuradoras de aguas residuales. Sin embargo, en otros países como en los Estados Unidos de América, el nivel máximo permitido de Coliformes fecales presentes en los fangos digeridos anaeróbicamente puede llegar hasta  $2 \times 10^6$  NMP (Número Más Probable) por gramo de materia seca. Por tanto, la utilización de fangos de depuradoras de aguas residuales como fertilizantes de suelos agrícolas, es un procedimiento polémico por la posible contaminación de suelos y aguas debido a la difusión de patógenos (Gondim Porto, 2013).

Debido a la inexistencia de una normativa nacional específica sobre los límites legales de parámetros microbiológicos para los fangos aplicados en terrenos agrícolas, se han considerado los parámetros que se describen en el Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. Estos parámetros tenidos en cuenta en el presente trabajo son los que se describen en la Tabla 9.

TABLA 9. PARÁMETROS LEGISLADOS EN EL RD 1620/2007.

<b>PARÁMETROS</b>
Coliformes totales
<i>Escherichia coli</i>
Sólidos en Suspensión
<i>Clostridium spp</i>
<i>Salmonella spp</i>

#### 2.4.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS FANGOS DE EDAR

Una de las principales características de los fangos es la heterogeneidad de su composición. La variabilidad de las características físico-químicas y microbiológicas de los fangos de EDARs gira en torno a los siguientes aspectos básicos (García Ganuza et al., 2010):

- Origen del influente, ya sea urbano, industrial o urbano-industrial.
- Variaciones estacionales del caudal.
- Diferentes procesos a los que son sometidos los fangos en las EDAR.

Los microorganismos patógenos son organismos presentes en las aguas residuales. Se incorporan a las mismas a través de los sistemas metabólicos de hombres y animales. Debido a su capacidad infectiva, su control supone un importante reto médico y de salud pública. Su destrucción o supervivencia está muy controlada en sistemas simples pero en matrices biológicas complejas como habitualmente son los fangos de depuradora, es más difícil predecir.

Los fangos provenientes de las estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas contienen una gran variedad de patógenos. La mayoría de los mismos presentan poca resistencia en condiciones ambientales habituales por lo que son sobre un número reducido de los mismos sobre los que un operador de planta debe fijarse (García Ganuza et al., 2010)

La propuesta de Directiva de la Comunidad Europea (EC, 2003) establece una serie de microorganismos elegidos tanto por sus características como por la relativa sencillez de detección por métodos analíticos disponibles. Dichos patógenos son: *Clostridium spp*, *Escherichia coli*, *Salmonella spp* y *Huevos de Ascaris*.

A continuación se describen los citados organismos patógenos:

##### *Clostridium spp.*

Es un patógeno presente en heces de determinadas aves y que debido a su gran resistencia en su forma esporulada se encuentra en muestras de suelo. Forman parte de la flora intestinal de animales y personas transmitiéndose al ser humano a través de alimentos contaminados y generándole toxiinfecciones alimentarias. Se trata de un germen aerobio que posee la capacidad de esporular una vez cuando se ve sometido a condiciones adversas. En la propuesta de directiva se pide el control de sus esporas (García Ganuza et al., 2010). (Figura 9).

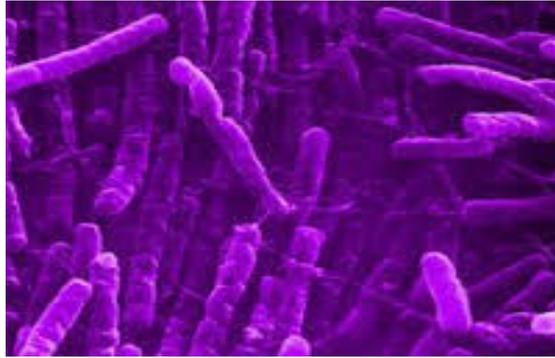


FIGURA 9. *CLOSTRIDIUM SPP.* FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.

### Coliformes totales

Los microorganismos coliformes son adecuados como indicador de contaminación bacteriana debido a que estos son comunes en el tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, en grandes cantidades. Permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se consideran que se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2002).

Los microorganismos que conforman el grupo de los Coliformes totales son: *Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*. Viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales. (Figura 10)

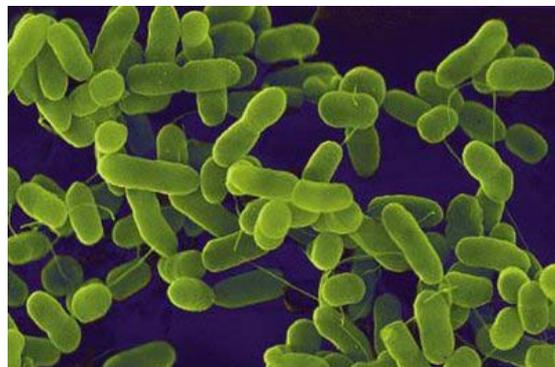


FIGURA 10. COLIFORMES TOTALES. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.

### *Escherichia coli*

Son organismos inofensivos cuando se encuentran en el hábitat intestinal. Aunque diferentes cepas de *Escherichia coli* son patógenas gastrointestinales graves para los seres humanos. La *Escherichia coli* patógena se distingue de otras por su capacidad de provocar enfermedades mediante mecanismos genéticamente controlados, como la producción de toxinas, la adhesión e invasión de células huéspedes, la interferencia con el metabolismo celular y la destrucción de tejidos. La presencia de *Escherichia coli* es muy frecuente en aguas residuales ya que son de procedencia fecal. (García Ganuza, et al, 2010) (Figura 11)



FIGURA 11. *ESCHERICHIA COLI*. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.

### *Salmonella spp.*

Es un género de bacterias que pertenece a la familia *Enterobacteriaceae*, formado por bacilos gramnegativos, anaerobios facultativos, con flagelos peritricos que rodean al microorganismo y no desarrollan cápsula ni espora. Están presentes en el intestino de personas y animales sanos, principalmente, aves de corral, ganado vacuno y porcino, sin provocar problemas para su salud, de forma que las heces son el principal foco de contaminación a los alimentos y al agua. (Fundación Vasca para la seguridad agroalimentaria, 2013) (Figura 12)



FIGURA 12. *SALMONELLA SPP.* FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.

### *Huevos de ascaris*

*Ascaris lumbricoides* es el gusano intestinal más grande que parasita al hombre, pertenece al filo de los Nematodos. Su ciclo de vida es directo, no teniendo más que un hospedador, que es el hombre. Las vías de entrada pueden ser mediante digestiva, mucosa o parenteral. El ciclo comienza cuando el hombre ingiere los huevos embrionados que contienen una larva infectante. Una vez en el intestino del hospedador, las larvas son liberadas del huevo y a través del torrente circulatorio alcanzan otros órganos como los pulmones y el corazón (Figura 13).

La ascariasis es una enfermedad rara y normalmente asintomática en los países desarrollados. Los síntomas, que en parte dependen de la carga parasitaria, son:

## 2. ANTECEDENTES

urticaria, inflamación, fiebre, hipersensibilidad, eosinofilia pulmonar simple o síndrome de Löffler. Después aparecen trastornos digestivos como: vómitos, náuseas, dolor abdominal, pérdida de apetito y diarrea. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, 2013)

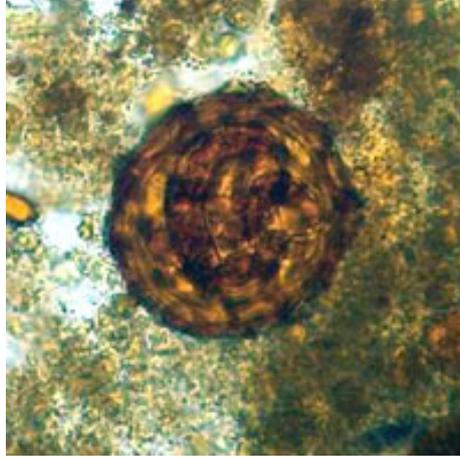


FIGURA 13. HUEVO DE ASCARIS EMBRIONADO. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.

## 2. ANTECEDENTES

Además de contaminantes microbiológicos los fangos de EDAR pueden contener otros contaminantes, como los parámetros físico-químicos que se describen en la Tabla 10.

TABLA 10. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y VALORES MEDIOS DE LOS FANGOS. FUENTE: (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, 2009)

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	VALORES MEDIOS DE LOS FANGOS
pH	Acidez o alcalinidad de una sustancia	Próximos a la neutralidad
Conductividad eléctrica	Contenido total en sales solubles en el residuo.	Oscilan entre 2.000 y 12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque la mayoría presentan rangos entre 5.000 y 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
Carbono	Proporciona información sobre la capacidad del residuo para suministrar compuestos orgánicos, que mejoren la fertilidad de los suelos.	Los valores de carbono total oscilan entre 15 y 55%, dependiendo de su procedencia de los fangos
Nitrógeno	Es uno de los nutrientes esenciales para el metabolismo del suelo y la nutrición de las plantas, siendo uno de los parámetros de mayor interés.	Los valores medios oscilan entre 3,5 y 4,5%. Aunque valores altos de pH facilitan la pérdida de nitrógeno
Fosforo	Representan uno de los macronutrientes esenciales en los que se basa el cálculo de la dosis de fertilizantes	Alrededor de 2.500-3.000 mg/kg de materia seca, lo que equivale, aproximadamente, al 30% del fósforo total.
Potasio	Representan uno de los macronutrientes esenciales en los que se basa el cálculo de la dosis de fertilizantes	El rango de valores para el fósforo total, está comprendido entre 1.000 y 10.000 mg/kg de materia seca.
Calcio	Su presencia en los fangos está condicionada por el origen del agua residual y por el tratamiento recibido.	Los valores de cadmio total oscilan entre 10.000- 120.000 mg/kg de materia seca.
Magnesio	La concentración de este parámetro es variable dependiendo del origen de las aguas residuales.	El magnesio asimilable presenta valores que oscilan alrededor de 2.000 mg/kg de materia seca
Sodio	Se trata de un parámetro relacionado con los valores de conductividad	Los valores medios oscilan entre 1.000 y 1.500 mg/kg de m.s seca.

Con respecto a los metales pesados, la cantidad de éstos en los fangos de depuración depende, en la mayoría de los casos, del tipo de vertido y el tratamiento realizado en la estación depuradora. Los procesos industriales en los que se emplean materias primas que contienen un alto contenido en metales pesados son una importante fuente de los mismos en los fangos de depuradoras. Los metales pesados principalmente detectados en fangos son: Cu, Ni, Zn, Cr, Hg, Pb y Cd (European Comision, 2001).

### 2.4.3. USOS PRINCIPALES DE LOS FANGOS

Para decidir el destino final de los fangos de depuradora, resulta fundamental su caracterización, ya que solamente así se puede entender su evolución en el tiempo y posibles cambios (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

Respecto al destino final de los fangos de depuradora, éste ha de estar perfectamente controlado para no causar contaminación, y ha de poseer los menores riesgos posibles para el medio ambiente. La disposición final de estos materiales está estrechamente ligada a las disposiciones legales vigentes cuyo objetivo es minimizar los potenciales impactos medioambientales, consiguiendo el aprovechamiento de este recurso. Entre los destinos más utilizados para estos materiales, se pueden citar los siguientes (Murcia Navarro, 2013):

- Aplicación en los suelos. Los fangos son, en la mayor parte de casos una fuente de materia orgánica importante. No obstante debe hacerse de forma racional y coherente para no provocar riesgos innecesarios.

La aplicación de fangos en suelos supone un ahorro doble de energía. Se emplea para eliminar los fangos, y por otra parte permite aprovechar sus propiedades para ser usado como fertilizante de síntesis.

- Recuperación de energía. Desde el punto de vista energético se han considerado los fangos como punto de partida para la obtención de metano, fuel e hidrocarburos en general. Es una alternativa estudiada cada vez con más interés, aunque por el momento no es una solución económicamente viable.
- Depósito en vertederos controlados. Este método de eliminación impide aprovechar los recursos contenidos en los fangos EDAR. El depósito de los fangos en vertederos controlados se suele efectuar combinándolos con los residuos sólidos urbanos. Este procedimiento es aceptable desde el punto de vista medioambiental y es una solución asequible en aquellas ciudades que tengan un vertedero controlado de residuos urbanos.

## 2. ANTECEDENTES

- **Incineración.** Puede ser una opción válida cuando dispongan de características especiales que los hagan ser considerados como valorizables energéticamente. Se trata de un tratamiento caro debido a la necesidad de controlar perfectamente las emanaciones gaseosas y cenizas volátiles. Supone un desperdicio energético importante, además de reducir solamente a la mitad el volumen de fangos y de que las cenizas deben de ser eliminadas.
- **Otros.** La recuperación de nitratos, fosfatos y determinados elementos metálicos a partir de los fangos residuales ha sido ensayada en plantas piloto mediante distintas tecnologías, pero en la mayoría de los casos estos procesos no resultan rentables. También se están desarrollando algunas aplicaciones novedosas de los fangos como puede ser la utilización de éstos y de sus cenizas para elaborar piedra artificial, como material para asfaltado de carreteras y la utilización de la mezcla de fangos y arcilla para la confección de ladrillos.

Por su condición de residuo se establece el orden en la jerarquía de opciones de su gestión: reducción, reutilización, reciclado, y otras formas de valorización. Sólo cuando no sea posible la gestión de los residuos a través de los sistemas anteriormente citados, se procederá a su eliminación. Por ello, tal y como señala el Plan Nacional de Fangos de Depuradora de Aguas Residuales (2001-2006), el depósito final en vertedero es la última opción, la menos satisfactoria (Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio, D. G. del Medio Ambiente, 2005).

En la Figura 14 se muestran los porcentajes de las diferentes alternativas de gestión de fangos que se han utilizado en las diferentes comunidades autónomas españolas.

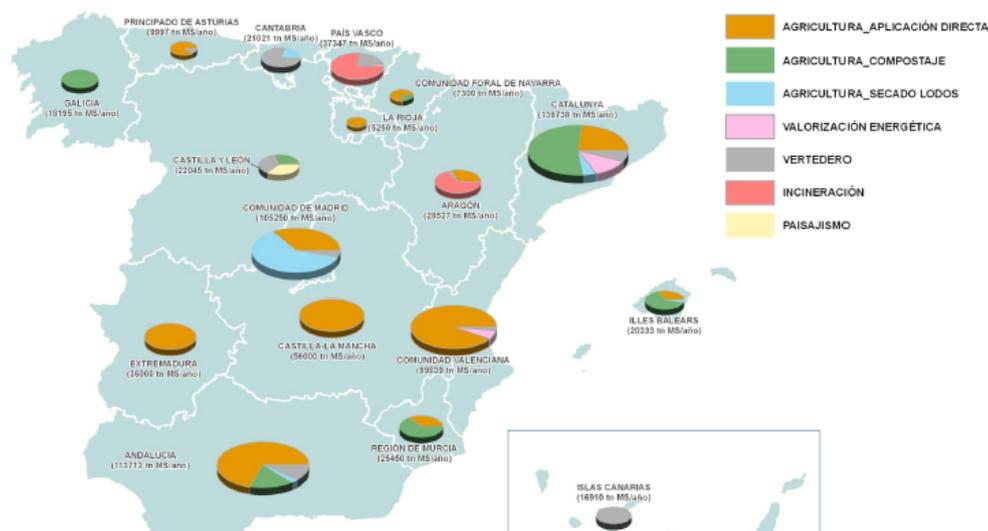


FIGURA 14. ALTERNATIVAS DE LA GESTIÓN DE FANGOS EN ESPAÑA. FUENTE: ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO

## 2. ANTECEDENTES

Así pues, siempre que los fangos cumplan con los requisitos legales, incluidos los que puedan establecerse en el futuro a través de modificaciones legislativas (bajo contenido en metales pesados y otros contaminantes orgánicos, así como en patógenos) y exista disponibilidad de suelo apto para su aplicación, se considera que la opción más sostenible es el reciclaje de nutrientes y materia orgánica mediante su aplicación al suelo, puesto que la composición de estos fangos, aunque variable, les convierte en una fuente de material y de elementos fertilizantes (Ministerio de agricultura, alimentación y Medio Ambiente, 2013).

Debido a que los suelos que se encuentran en la región mediterránea se caracterizan por ser más propensos a la degradación por erosión, y que, las últimas predicciones de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), indican que para el año 2050, la población mundial será de 9.100 millones de habitantes, si se analiza el consumo global de cereales previsto para el año 2050, en base a los datos del consumo per cápita, se estima que para una población de 9.100 millones de personas y un consumo de unos 340 kg por persona y año, el consumo total será de unos 3.094 millones de toneladas. Se hace por tanto necesario incrementar los rendimientos de los cultivos, empleando técnicas que permitan practicar una agricultura productiva, pero también sostenible (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

La fertilidad del suelo se entiende como su capacidad para suministrar todos y cada uno de los nutrientes que necesitan las plantas en cada momento, en la cantidad necesaria y de forma asimilable. La Figura 15 describe los agentes que influyen en la fertilidad de los suelos, ya que, la asimilabilidad de los elementos nutritivos del suelo no depende sólo de la forma en que se encuentren, sino también del clima, genética de la planta, estado de desarrollo, propiedades físicas y químicas del suelo, etc. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).



FIGURA 15. FACTORES INFLUYENTES EN FERTILIDAD DE UN SUELO. FUENTE: (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, 2011).

Una buena planificación para el manejo adecuado de la fertilidad del cultivo debe iniciarse con un análisis del suelo. Con esta herramienta se puede hacer una estimación de la disponibilidad de nutrientes para la planta durante su ciclo de desarrollo (Instituto Nacional de Innovación y transferencia agropecuaria, 2009).

## 2. ANTECEDENTES

Los fertilizantes permiten restituir a los suelos los elementos nutritivos que las plantas extraen, o que los suelos pierden por lavado, retrogradación y erosión, poniendo a disposición de los cultivos los nutrientes que precisan en cada momento. Cualquier material natural o industrializado, que contenga al menos un cinco por ciento de uno o más de los tres nutrientes primarios ( $N_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ), puede ser llamado fertilizante (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2002).

Para llevar a cabo los procesos fisiológicos y metabólicos que les permiten desarrollarse, las plantas necesitan tomar del medio una serie de elementos indispensables. Es, a partir del análisis de la materia seca de los vegetales, como se describen sus constituyentes esenciales (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

- Nutrientes esenciales. Suponen el 99% de la masa y son: carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), potasio (K) y calcio (Ca)
- Micronutrientes. Necesarios en muy pequeñas cantidades. Son: hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), níquel (Ni) y cloro (Cl).

Los abonos orgánicos se han recomendado en aquellas tierras sometidas a cultivo intenso para mejorar la estructura del suelo, y aunque también aportan nutrientes, actúan sobre todo, mejorando las propiedades físico-químicas de los suelos y su actividad biológica, aumentando con ello, la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2002).

La composición de los abonos se expresa mediante tres números que indican las proporciones de los tres nutrientes NPK: el primer número se refiere al nitrógeno, el segundo al fósforo y el tercero al potasio, pues el nitrógeno va expresado como ( $N_2$ ), el fósforo como pentaóxido ( $P_2 O_5$ ) y el potasio como óxido ( $K_2O$ )

Los fangos poseen la mayoría de nutrientes necesarios para las plantas pero su poder fertilizante varía de acuerdo con la procedencia, los procesos de depuración y tratamientos finales a que han sido sometidos. Aunque en algunas aplicaciones, el contenido en fósforo y sobre todo en potasio de los fangos puede resultar demasiado bajo para satisfacer las demandas específicas de las plantas (García Izquierdo, 2007).

En general y en base a estudios previos, la adición de fangos a los suelos resulta eficaz, mejorando considerablemente sus niveles nutricionales, produciéndose un mejor desarrollo del cultivo y una disminución en los costes de fertilización, ya que la obtención de fangos de depuradora es más barata que la de fertilizantes comerciales (García Izquierdo, 2007).

#### 2.4.4. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE FANGOS DE EDAR EN AGRICULTURA

Debido a la composición variable de los fangos y su creciente utilización en el sector agrario se hace necesaria la realización de estudios y análisis de caracterización, ya que por su fuente como materia orgánica y elementos fertilizantes se han desarrollado leyes que regulan su correcta gestión y utilización en la agricultura con el fin de no alterar el equilibrio ecológico y teniendo en cuenta la protección de los factores físicos y bióticos (Vico Lopez, 2015).

Son las características agronómicas las que permiten establecer aquellas buenas prácticas agrícolas que determinen la cantidad, periodicidad y forma en que los fangos se puedan incorporar al terreno, a pesar de que hay otros parámetros como los físico químicos, microbiológicos y metales pesados que influyen en el uso de los fangos de depuradora tomando como referencia valores asignados a distintos contaminantes.

#### **CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA**

Los parámetros microbiológicos presentan una de las mayores restricciones introducidas por las nuevas propuestas de normativas. Se basa en asegurar las garantías higiénico- sanitarias dentro de las distintas gestiones de los fangos de depuradoras. Así el control de fangos en agricultura unido a una mayor exigencia en los tratamientos tiene por objetivo evitar la propagación de microorganismos patógenos (European Comision, 2001).

La supervivencia de los patógenos en los fangos, aplicado en el suelo, depende principalmente de las condiciones ambientales, el pH, la humedad, el tiempo de retención en los fangos y las características de los organismos presentes (European Commission, 1995).

- *Clostridium spp.* Las condiciones que favorecen el crecimiento y la producción de toxinas de *Clostridium spp* son: Alta cantidad de proteínas, baja concentración de sales, pH ligeramente ácido o alcalino y temperaturas entre 3 y 50 °C (García Ganuza et al., 2010).
- Coliformes totales. La radiación solar, temperatura ambiente, el porcentaje de humedad y precipitación influyen significativamente en la reducción de Coliformes totales. En un principio la incorporación de fangos al suelo no va suponer un riesgo de contaminación permanente por bacterias Coliformes totales, ya que éstas desaparecen en la mayoría de los casos en un plazo no superior a 100 días en los suelos.

## 2. ANTECEDENTES

- *Escherichia coli*. Puede sobrevivir en suelos contaminados hasta 20 meses. Además, puede sobrevivir durante largos períodos en las hojas y raíces de los cultivos. Las hojas más tiernas ofrecen un hábitat mejor que las maduras, y las hojas con mayores niveles de nitrógeno o las hojas y las frutas acelerando la multiplicación de la *Escherichia coli* y prolongando su supervivencia (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura, 2013).
- *Salmonella spp.* El tiempo de supervivencia de *Salmonella spp* en el suelo puede variar entre 15 a 280 días. Por ello se recomienda realizar tanto análisis de presencia como la cuantificación del patógeno *Salmonella spp* en el suelo para definir el tiempo de permanencia y la concentración en la que pueda llegar a convertirse en un problema de salud pública (Lares Mena, 2007).

Si se han aplicado a los cultivos inadecuadamente o colocado en un vertedero de superficie, los seres humanos y animales pueden estar expuestos a microorganismos patógenos directamente por venir en contacto con los fangos de aguas residuales, o indirectamente por el consumo de agua potable o alimentos contaminados. Insectos, aves, roedores, e incluso los trabajadores agrícolas podrían contribuir a estas vías de exposición por el transporte de fangos de depuradora de aguas residuales, tal y como se observa en la Figura 16, donde se muestran las posibles rutas de contaminación microbiológica sobre los cultivos.

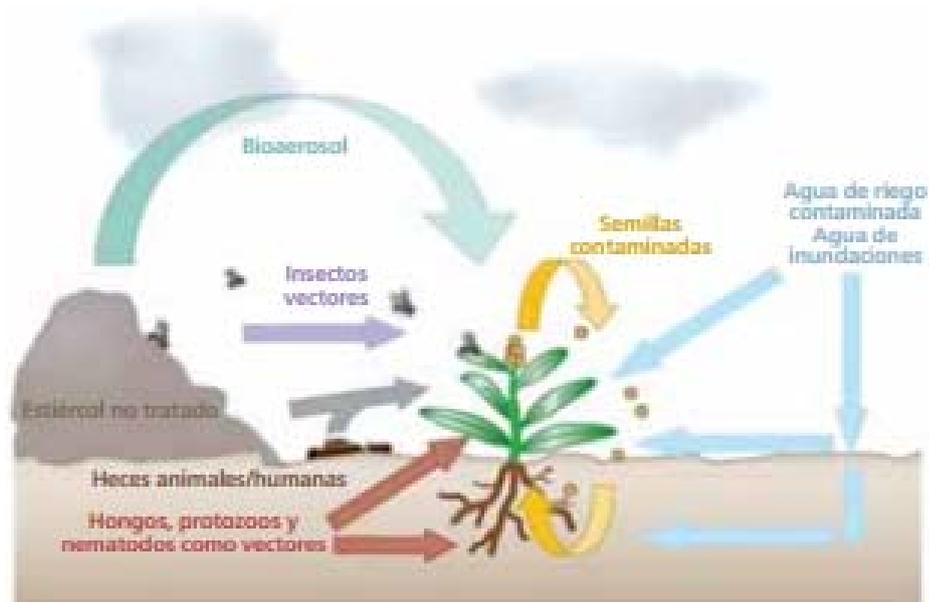


FIGURA 16. RUTAS DE CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA SOBRE HUMANOS. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES

### **CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

Dentro de los parámetros físico-químicos en los fangos, los más influyentes de cara a su uso agrícola son el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de humedad y la materia orgánica.

- pH: Ha de tenerse en cuenta por la variabilidad que pueda introducir en el suelo, y por tanto, en la correcta asimilación por parte de las plantas y los nutrientes necesarios para su desarrollo (García Ganuza et al., 2010).
- Conductividad eléctrica. Al aplicarse al suelo, estas sales incrementan la propia conductividad. Así pues, la conductividad puede constituir un factor limitante si se sobrepasan valores por encima de los cuales la presión osmótica en el medio sea tal que la raíz no pueda extraer agua o nutrientes.

La mayoría de los cultivos responden adecuadamente a suelos con valores entre 100 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Algunas especies soportan hasta 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pero por encima de 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se hace imposible el cultivo.

- Contenido de humedad. Dependiendo del tratamiento realizado sobre los fangos de depuradoras, la humedad, va a variar muy significativamente, influyendo en diferentes parámetros como la compacidad, la actividad biológica, estado de humedad final, etc.
- Materia orgánica. Se considera básico de cara al empleo como enmienda orgánica de los fangos de depuradoras (Bermudez, 1997).

La materia orgánica determinará principalmente las propiedades enriquecedoras del suelo, interesa que haya sido transformada previamente de forma que se rompan las formaras complejas (lípidos, proteínas, carbohidratos y fibras). Durante los procesos biológicos la materia orgánica se hidroliza y posteriormente se transforma dichos compuestos como ácidos grasos, aminoácidos, hidrocarburos insaturados entre otros y en último estado como ácidos húmicos que mejoraran las propiedades estructurales del suelo aumentado su capacidad de retener agua.

La materia orgánica tiene mucha importancia ya que incide en diferentes propiedades del suelo: estructura, porosidad, permeabilidad, capacidad de retención de agua, aireación, pH, capacidad de intercambio iónico, etc.

### **CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA**

Dentro de los parámetros agronómicos son el nitrógeno, el fósforo y el potasio los que determinaran la dosificación apropiada para un determinado cultivo. Una característica destacada que presentan los fangos de depuradora en su uso como fertilizantes es la liberación gradual de los nutrientes que contienen, lo que supone que el incremento de la fertilidad de un suelo se mantiene en cultivos sucesivos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

- **Nitrógeno**. Es uno de los nutrientes esenciales para el metabolismo del suelo y la nutrición de las plantas, por lo que es uno de los parámetros de mayor interés, ya que participa en la multiplicación celular y es determinante en el crecimiento y desarrollo de la planta (García Ganuza et al., 2010).

Se puede encontrar como:

- Nitrógeno orgánico. De más lenta asimilación por parte del cultivo debido a su necesidad de transformación en el suelo por la planta. La mineralización del nitrógeno orgánico se lleva a cabo gracias a la actividad de los microorganismos.
- Nitrógeno amoniacal. Puede asimilarse directamente por las plantas en pequeñas cantidades. Es poco móvil y debe nitrificarse para constituir una fuente inmediata de nitrógeno.
- Nitratos. Son inmediatamente asimilable y es el adecuado para cubrir las necesidades en este nutriente en los momentos de máxima exigencia para los cultivos, de mayor riesgo para el medio ambiente y en especial para acuíferos.

La relación carbono/nitrógeno informa de la cantidad de fangos que ha de aplicarse para tener buenas propiedades fertilizantes. Los fangos bien estabilizados suelen presentar relaciones C/N alrededor de 10 y se podrían utilizar como abonos orgánicos nitrogenados, por el contrario los poco estabilizados presentan relaciones C/N entre 15-20 y pueden ocasionar problemas de inmovilización en el suelo (García Ganuza et al., 2010).

- **Fósforo**: Puede estar presente como fósforo orgánico o como sales inorgánicas insolubles del mismo, siendo ambas formas de muy lenta asimilación. El fósforo presente en forma de ortofosfatos es de rápida asimilación por las plantas (García Ganuza et al., 2010).

## 2. ANTECEDENTES

Se encuentra en forma compleja en los fangos sin tratar y en forma disuelta, como ortofosfatos en los fangos tratados. Además se ha de tener en cuenta que las sales inorgánicas formadas en la desfosforilación química utilizada en la línea de aguas, hacen lenta su asimilación de fósforo en los terrenos y por tanto también se habrá de tener en cuenta a la hora de decidir la dosis a aplicar.

- Potasio. En los fangos se encuentran en forma de cloruros fácilmente asimilables para las plantas (García Ganuza et al., 2010).

Así, una vez determinado el cultivo sobre el que se va a disponer y evaluadas las características hidrogeológicas que aseguren la no contaminación del medio, se decidirá la cantidad de fangos a disponer en cada momento por las necesidades del mismo de nitrógeno, luego de fósforo y por último de potasio. En base a las propiedades de los fangos y a la manipulación del mismo estas cantidades marcarán las necesidades de completar el abonado con productos comerciales así como la composición más adecuada del mismo.

### **CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS.**

El problema de la incorporación de los metales pesados al suelo radica principalmente en que algunos pueden ser muy móviles y asimilables por las plantas por lo que pueden provocar efectos tóxicos en las mismas o se pueden acumular en sus tejidos, presentando un riesgo de contaminación de los eslabones sucesivos de la cadena trófica (García Ganuza et al., 2010).

El pH y el estado de oxidación determinan si los metales se eliminarán por las plantas incorporándose a la cadena trófica o se acumulan en el terreno pudiendo contaminar las aguas subterráneas.

Entre los vegetales, la tolerancia a los metales varía en gran medida entre especies, pudiendo éstos pasar a formar parte de la cadena alimenticia y llegar, en última instancia al hombre. Si las plantas no se consumen, vuelven a restituir nuevamente esos elementos en el suelo en formas asimilables, por lo que se verificará una acumulación continua de metales pesados.

De entre los metales pesados podemos distinguir dos grupos:

- Cu, Ni, Zn y Cr: en pequeñas concentraciones son necesarios para el crecimiento de las plantas, pero a partir de ciertas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos.
- Hg, Pb y Cd: Sin función biológica y de elevada toxicidad.

## 2.4.5. SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE FANGOS DE DEPURADORA EN ESPAÑA

**NIVEL NACIONAL**

Observando el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, se puede apreciar como en el periodo considerado, las comunidades autónomas que se presentan como mayores productoras de fangos son las Comunidad Valenciana, Madrid, Cataluña y Andalucía.

Según el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos en España, aunque en los últimos años la cantidad de fangos generados se ha mantenido estable, en torno a 1.000.000Tm.s./año. Sí se considera una humedad media aproximada de un 80%, en España se generan alrededor de 5.000.000 t/año de fangos (Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio Ambiente, 2015).

En la Tabla 11 se muestra la cantidad de fangos de depuración generados en cada comunidad autónoma, conforme a la información más reciente disponible en el Registro Nacional de Fangos (2012).

TABLA 11. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FANGOS DE DEPURACIÓN, DESGLOSADA POR CCAA (2008-2012).  
FUENTE: REGISTRO NACIONAL DE FANGOS

PRODUCCIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN (t m.s./año)					
CCAA	2008	2009	2010	2011	2012
ANDALUCÍA	100.057	111.437	119.688	126.447	128.727
ARAGÓN	31.049	31.254	29.753	28.823	29.537
PRINCIPADO DE ASTURIAS	2.229	2.551	4.686	5.303	3.504
ISLAS BALEARES	66.811	66.811	53.324	46.758	44.221
ISLAS CANARIAS	17.940	26.335	31.455	31.422	31.422
CANTABRIA	8.383	14.279	9.995	12.505	27.800
CASTILLA-LA MANCHA	46.976	48.070	51.768	57.802	58.094
CASTILLA Y LEÓN	48.369	61.757	64.995	67.055	64.912
CATALUÑA	302.537	136.145	140.078	134.806	135.058
CIUDADES AUTÓNOMAS DE CEUTA Y MELILLA	1.460	1.460	1.418	1.267	982
EXTREMADURA	9.430	9.430	7.829	11.085	11.480
GALICIA	63.091	73.513	68.200	60.161	60.201
LA RIOJA	14.769	16.476	9.199	10.635	9.533
COMUNIDAD DE MADRID	228.888	260.192	229.462	199.544	193.722
REGIÓN DE MURCIA	10.558	18.262	29.954	31.808	34.623
COMUNIDAD NAVARRA	9.794	9.794	8.469	10.268	10.473
PAIS VASCO	24.399	24.407	28.125	24.620	39.690
COMUNIDAD VALENCIANA	169.435	292.951	198.322	198.690	198.690
<b>TOTALES</b>	<b>1.156.175</b>	<b>1.205.124</b>	<b>1.086.720</b>	<b>1.058.999</b>	<b>1.082.669</b>

En cuanto a los tratamientos o destinos finales, y según la información del Registro Nacional de Fangos, el 80% de los fangos generados en 2012 fueron aplicados en los suelos agrícolas y el 6% se destinaron a otros destinos como la fabricación de fertilizantes, el 7% fueron incinerados, y el restante 7% fueron eliminados en vertedero. Por lo tanto, se han alcanzado los objetivos cuantitativos establecidos en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008-2015 en cuanto a la

## 2. ANTECEDENTES

aplicación en suelos agrícolas (67% como mínimo) y eliminación en vertedero (12% como máximo). Sin embargo, el porcentaje en fangos destinados a incineración ha disminuido entre 2008 y 2012, y a pesar de ello no se ha alcanzado el objetivo establecido (3% como máximo), así como tampoco se ha llegado a alcanzar el objetivo de valorización en otros suelos u otros tipos de valorización (18% objetivo mínimo).

De este modo, tal y como se observa en la Tabla 12, donde se desglosa el destino final de los fangos generados en cada comunidad autónoma del estado español, la aplicación al suelo con fines de fertilización y reciclaje de los nutrientes y de la materia orgánica, la valorización energética y el depósito en vertedero son los principales destinos posibles para fangos de depuradoras. La primera de estas opciones es la que se emplea con un mayor porcentaje, ya que es la más sostenible. Sin embargo, para su empleo agrícola es obligatorio someter a los fangos a tratamientos, con el fin de potenciar y mejorar el reciclaje de este tipo de residuos. Se hace necesario por lo tanto el impulso y fomento de líneas de tratamiento para los fangos, a fin de limitar el contenido en metales pesados.

TABLA 12. DESTINO FINAL DE LOS FANGOS GENERADOS EN CADA COMUNIDAD AUTÓNOMA. FUENTE REGISTRO NACIONAL DE FANGOS (2012)

CCAA	Lodos generados (t.m.s.)	Destinos							
		Aplicados en suelos agrícolas		Eliminados en vertedero		Incinerados		Otros destinos	
		(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%	(t.m.s.)	%
C.A. Andalucía	110.109	93.892	85%	14.315	13%	0	0%	1.902	2%
C.A. Aragón	29.537	9.106	31%	431	1%	20.000	68%	0	0%
C. Foral de Navarra	12.631	12.313	97%	0	0%	0	0%	319	3%
C.A. Canarias	31.422	0	0%	30.966	99%	0	0%	456	1%
C.A. Cantabria	27.800	18.127	65%	3.827	14%	0	0%	5.846	21%
C.A. Castilla-La Mancha	58.112	51.970	89%	1.132	2%	0	0%	5.009	9%
C.A. Castilla y León	64.910	60.686	93%	3.929	6%	0	0%	294	0%
C.A. Cataluña	135.058	107.320	79%	1.231	1%	24.668	18%	1.840	1%
Ciudades Autónomas de Ceuta y Melilla	982	0	0%	0	0%	982	100%	0	0%
C. de Madrid *	197.345	185.656	94%	5.373	3%	1.234	1%	5.082	3%
C. Valenciana	198.690	184.583	93%	1.802	1%	163	0%	12.143	6%
C.A. Extremadura	14.357	11.423	80%	2.892	20%	0	0%	43	0%
C.A. Galicia	110.346	96.318	87%	5.030	5%	2.693	2%	6.305	6%
C.A. Islas Baleares	44.221	20.796	47%	4.122	9%	0	0%	19.303	44%
C.A. La Rioja	19.040	19.022	100%	0	0%	0	0%	19	0%
Principado de Asturias	2.548	1.688	66%	836	33%	0	0%	25	1%
C.A. País Vasco	39.138	8.838	23%	3.505	9%	25.518	65%	1.277	3%
Región de Murcia	34.515	33.194	96%	1.098	3%	0	0%	223	1%
<b>ESPAÑA</b>	<b>1.130.761</b>	<b>914.929</b>	<b>81%</b>	<b>80.490</b>	<b>7%</b>	<b>75.258</b>	<b>7%</b>	<b>60.084</b>	<b>5%</b>

**NIVEL AUTONÓMICO. COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA**

En Navarra, Comunidad Autónoma donde se sitúa el contexto de este Trabajo de Fin de Grado, tal y como comenta el Plan integrado de gestión de residuos de Navarra para 2025:

- La generación de fangos de depuradora, tras unos años de estabilidad, ha experimentado un aumento, principalmente por la detección y contabilización de nuevos fangos. La cantidad de fangos generada en 2014 ascendió a 76.454 toneladas.
- Analizando el tipo de tratamiento final efectuado sobre los fangos EDAR y asimilables en 2014, la aplicación directamente en suelo alcanza el 41% de los mismos. Le siguen los fangos sometidos a compostaje con un 35%, y la digestión anaerobia para un 20%. A operaciones de eliminación se somete al 4% de los fangos generados.
- Tal y como se observa en la Figura 17, donde se desglosa el destino final de los fangos de EDARs que se aplican al suelo, se destina un 88% a suelo agrícola, un 9% a otro tipo de suelo, en concreto, en aplicaciones de jardinería, y el 4% restante, se destina a vertedero, y corresponde a fangos estabilizados que no cumplen con los límites legales de concentración de metales para su aplicación en suelos.

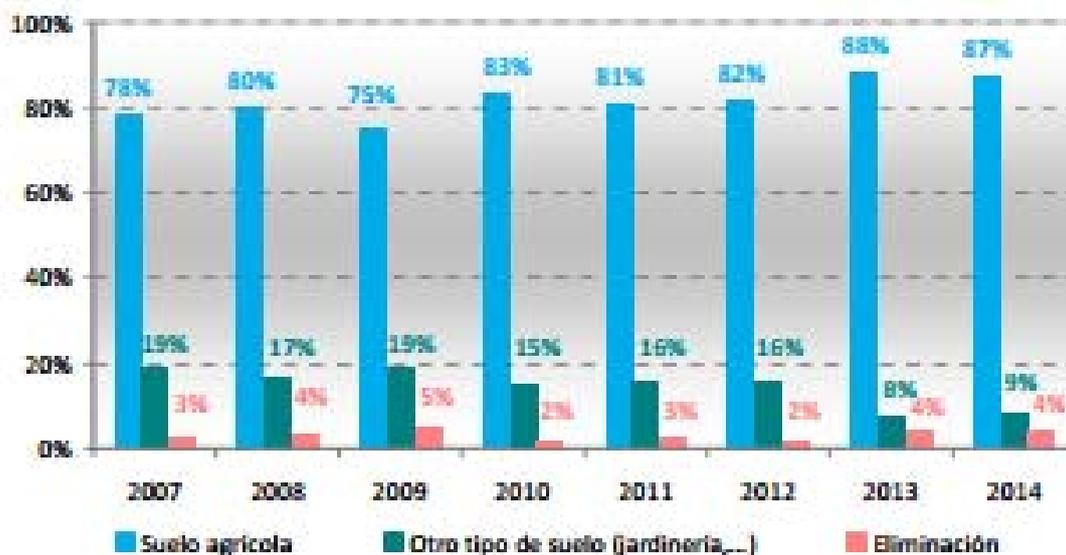


FIGURA 17. DESTINO FINAL DE LOS FANGOS DE EDARs. FUENTE: PLAN INTEGRADO DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE NAVARRA PARA 2025.

- En la Figura 18, donde se muestra el balance de la gestión desde el punto de vista de la jerarquía de gestión de los residuos, se refleja que se valoriza el 96% de los fangos de EDARs generados, mientras que la eliminación de los mismos se reduce a un 4%. La situación en el cumplimiento del objetivo que establece el Plan Estatal Marco de Residuos de valorización material de fangos de EDAR, es de 11 puntos por encima del valor objetivo del 85% para 2020. El Plan Estatal Marco de Residuos también establece un objetivo global del 15% de los fangos EDAR destinados a valorización energética y eliminación en vertedero, concretando un valor máximo para eliminación en vertedero del 7% máximo. Dado que no se efectúa valorización energética de los fangos de EDAR generados en Navarra, solo se evalúa el objetivo de eliminación en vertedero, cuya situación es positiva ya que se está tres puntos porcentuales por debajo del valor objetivo máximo.

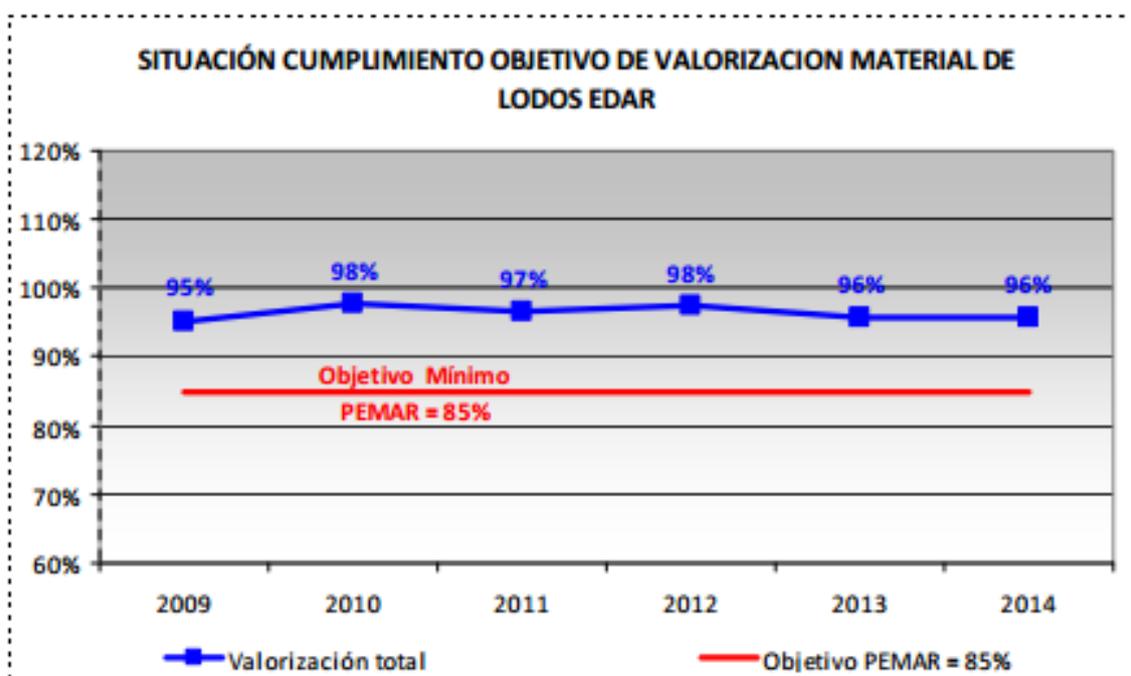


FIGURA 18. SITUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL USO DE LOS FANGOS EDAR. FUENTE: PLAN INTEGRADO DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE NAVARRA PARA 2025.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE TERRENOS Y APLICACIÓN DE FANGOS

La zona de estudio se encuentra en el término municipal de Úcar, municipio español perteneciente a la Comunidad Foral de Navarra. Los terrenos donde se realizan los abonados con fangos de la EDAR de Tudela se encuentran a ambos márgenes de la carretera nacional N-601.

El clima es de transición entre mediterráneo y atlántico. Se caracteriza por ser templado-frío, lleno de contrastes y que varía de un año a otro. La temperatura media anual es de 12,4 °C. Los cambios de invierno a primavera y de verano a otoño son bruscos. La media de las máximas es de 27,1 °C en agosto, el mes más cálido; la media de las mínimas es de 1,1 °C en enero, el mes más frío (Larraya Astibia, 2011).

El total de precipitaciones a lo largo del año es de un promedio de 772,5 l/m<sup>2</sup>. Anualmente llueve unos 132 días, que se concentran sobre todo en invierno. El mes con más precipitaciones es diciembre, mientras que los más secos son julio y agosto.

Los dos terrenos objeto de estudio son de 4 hectáreas cada uno, distanciados entre sí 887 metros. En ellos se aplican los fangos estabilizados de la EDAR de Tudela, municipio de dicha Comunidad Autónoma.

Para la diferenciación de ambos terrenos se denominan con distintos nombres, ya que presentan diferencias significativas entre ellos. En las Figura 19 se observan los dos tipos de campos de cultivos sobre los que se han aplicado los fangos.



FIGURA 19. VISUALIZACIÓN DE LOS CAMPOS DE CULTIVO. FUENTE. GOOGLE MAPS

Las principales diferencias y similitudes que ambos tipos de terrenos muestran son:

- El campo A presenta una textura arenosa, mientras que la del campo B es arcillosa. La textura se trata de una propiedad que influye sobre el laboreo, riesgo de compactación, disponibilidad de agua útil sobre las plantas, disponibilidad de nutrientes, penetración de raíces...En la Tabla 13 se observan la importancia de la textura sobre la capacidad de campo.

TABLA 13. DIFERENCIAS ENTRE LA TEXTURA PREDOMINANTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

FRACCION PREDOMINANTE	CARACTERÍSTICAS
SUPERFICIE ARENOSA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja compactación</li> <li>• Alta infiltración</li> <li>• Facilidad para laboreo</li> <li>• Alta capacidad retención agua disponible</li> <li>• Alta inercia térmica</li> </ul>
SUPERFICIE ARCILLOSA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta compactación</li> <li>• Baja infiltración</li> <li>• Dificultad para laboreo</li> <li>• Dificulta penetración de raíces</li> <li>• Alta Capacidad de intercambio térmico</li> </ul>

- Ambos campos han sido previamente cultivados con maíz y antes del abonado presentan todavía restos vegetales de la cosecha anterior. La última recogida es en el mes de febrero por lo que los campos llevaban un mes sin ser cultivados.
- La superficie de ambos campos es similar y presentan unas 4 hectáreas de terreno cultivable. En ambos se deja una parte de una hectárea sin abonar, con el fin de ser empleada como “blanco” para poder realizar estudios paralelos que sirvan de comparación. Previo al proceso de abonado de los campos, mediante un rotocultor se rompe y airea la superficie, quedando la superficie uniforme sobre todo el perfil.
- La cantidad de fangos aplicados en cada campo es de 25 Toneladas. Se aplican fangos provenientes de la misma EDAR pero el tiempo en el que permanecen en el campo previo a la aplicación es diferente. El Fango 1 es aplicado en la superficie arcillosa y permanece apilado un mes hasta su esparcimiento en el

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

terreno y el Fango 2, que se aplica en la superficie arenosa y permanece unas horas hasta su aplicación.

- Dispersión de fangos. El método por el que se realiza la aplicación consiste en una distribución en superficie de los fangos mediante una abonadora agrícola. Una vez cubierta la superficie de cultivo, se labra, con el fin de enterrar y remover los primeros centímetros de la superficie de cultivo con los fangos.
- Tras el acondicionamiento y preparación del terreno, se procede dos días después a la siembra de los cultivos correspondientes en cada campo por medio de una sembradora agrícola.



FIGURA 20. APEROS PARA EL ACONDICIONAMIENTO Y PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES

- La forma de riego de ambos campos consiste en riego por aspersión. Cada aspersor está separado unos 18 m del siguiente y cubren toda la superficie cultivable. El agua proviene del canal de Navarra que se encuentra a 1.45 km del campo A y a menos de 500 m del campo B.
- El Campo A es el primer campo sobre el que se realiza regadío por el Canal de Navarra. A partir de este punto abastece a un gran número de superficies de cultivo de la Comunidad Foral de Navarra.
- Ambos cultivos presentan una ligera pendiente, más pronunciada en el campo B, pero no influye como en la práctica agrícola.
- Cada campo se cultiva con un tipo de cultivo diferente, aunque previamente los dos han estado con maíz, para la presente campaña el campo A va a ser cultivado con girasol y el campo B con maíz.
- Para el maíz el promedio de consumo hídrico se considera de unos 5000-6000 m<sup>3</sup>/ha para el desarrollo de todo el ciclo de cultivo alcanzando elevados niveles productivos. Para el girasol el consumo es menor, siendo este de unos 3000-4000 m<sup>3</sup>/ha.

### 3.2. TOMA DE MUESTRAS

Debido a las exigencias analíticas de los parámetros microbiológicos, es importante que el muestreo y los análisis en el laboratorio se realicen bajo condiciones de esterilidad, a pesar de que es prácticamente imposible que el muestreo se realice bajo una esterilidad estricta, debido a que las muestras son cogidas en un entorno natural abierto, en el que la contaminación cruzada es inevitable. Se ha intentado que ésta sea lo mínima posible para evitar alteraciones en los resultados, por lo que se emplea material nuevo que se encuentra ya esterilizado o se esteriliza todo el material con el que se realiza el muestreo, mediante el autoclavado en el laboratorio.

Para el presente estudio se han cogido cuatro tipos diferentes de muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

- Terrenos de cultivo. Previamente al abonado de los campos con los fangos se procede a un muestreo a unos 15 cm de la superficie de cultivo para obtener una caracterización previa de los terrenos.
- Fangos. Previamente al abonado los fangos, se descargan en las proximidades de los campos y se procede al muestreo para conocer la composición inicial de los fangos.
- Agua de riego. Para comprobar la influencia del agua de riego sobre los parámetros de caracterización a estudiar, se toman muestras de agua de las bocas de riego de ambos campos.
- Mezcla de terrenos y fangos. Tras labrar la superficie, se procede al abonado con los fangos de depuradora sobre los terrenos de cultivo, se voltean y mezclan ambas matrices (Figura 21).



FIGURA 21. MUESTREO DE MATRIZ SÓLIDA Y LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Tabla 14 se muestra la descripción de los muestreos realizados, mostrando en ella la frecuencia de los muestreos, la fecha, tipo de muestra recogida...

TABLA 14. DESCRIPCIÓN DE LA FRECUENCIA Y TIPOS DE MUESTRAS TOMADAS EN CADA JORNADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

MUESTREO	FECHA	TIPO DE MUESTREO	ESTACION
MUESTREO 1	02/05/2016	TERRENOS SIN ABONAR Y FANGOS	PRIMAVERA
MUESTREO 2	22/05/2016	AGUA DE RIEGO Y SUPERFICIE ABONADA	PRIMAVERA
MUESTREO 3	07/06/2016	AGUA DE RIEGO Y SUPERFICIE ABONADA	PRIMAVERA

Durante la parte experimental del trabajo se realizaron tres ensayos durante los meses de mayo a junio, tal y como describe la Tabla 14.

- En el muestreo M1 con fecha de 2 de mayo, se muestrea de forma sistemática el terreno inicial, previa a la aplicación de los fangos. Estos terrenos horas antes son volteados y aireados para la aplicación de los fangos apilados en las proximidades de la superficie a cultivar. Dichos fango son también muestreados previamente a su aplicación. En la Figura 22, se observa el terreno inicial antes de su volteado, aireación y abonado.



FIGURA 22. SUPERFICIE DE CULTIVO DEL CAMPO DE MAÍZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- En el muestreo M2 con fecha de 22 de Mayo, se realiza un muestreo sistemático de la superficie de cultivo. También se realiza un muestreo del agua de riego en las bocas de riego de cada campo.
- En el muestreo M3 con fecha de 7 de Junio, se realiza una toma de muestras similar al del segundo muestreo, muestreándose agua de riego y la mezcla de la superficie de cultivo y los fangos.

3.2.1. MUESTREO DE TERRENOS.

➤ Materiales para la toma de muestras

- Cubos autoclavados estériles
- Azadas
- Anaclín estéril
- Nevera
- Rotulador para marcaje e identificación de las muestras
- Termómetro
- Isopropanol
- Bolsas de plástico para muestreo
- Papel de limpieza
- Bolsas de autoclave
- Guantes de látex

➤ Condiciones de muestreo

Para el muestreo de la matriz sólida que corresponde a la superficie de cultivo se procede mediante un muestreo sistemático, aprovechando que los pivotes de riego por aspersión formaban un cuadrado de aproximadamente  $18m^2$ .

➤ Método de muestreo.

La forma de muestreo es mediante muestreo sistemático, para ello, las parcelas se dividen en 57 polígonos de  $18 m^2$  cada uno. En cada polígono se recoge con una azada una porción de terreno a unos 15 cm de profundidad. Cada porción es acumulada en un cubo autoclavado previamente en el laboratorio hasta completar el muestreo total de la superficie a cultivar.

Cuando se terminan los muestreos, el contenido de los cubos es depositado sobre una superficie aislada del campo agrícola y se procede a obtener una porción significativa de las muestras por medio del método de cuarteos. Este método consiste en los pasos que se describen a continuación y en la Figura 23 (Laboratorio experimental del departamento de ingeniería civil y minas, 2003):

- Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana y limpia, donde no pueda haber pérdida de material ni contaminación.
- Se homogeneiza el material trasladando la muestra y acomodándolo en la pila.
- Se ejerce presión por medio de la pala, sobre el vértice, aplanando con cuidado la pila hasta que obtener un espesor y un diámetro uniformes.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala.
- Se eliminan dos de las partes diagonalmente opuestas.
- Se mezcla y homogeneiza el material restante y se cuartea sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas.

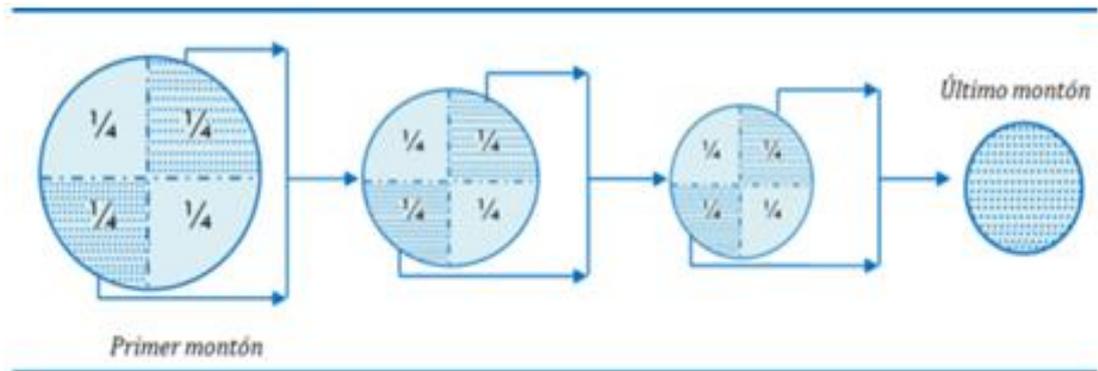


FIGURA 23. MÉTODO DE CUARTEOS. FUENTE. GOOGLE IMAGENES

#### ➤ Identificación de muestras

Los recipientes para las muestras se marcan claramente y sin ambigüedad, identificándolas de tal forma que cada muestra pueda ser relacionada con la localización de donde fue tomada.

#### ➤ Almacenamiento y transporte

Las muestras se transportan de forma que se minimizaran los cambios en el contenido de agua del suelo y se mantienen a una temperatura adecuada, en frascos estériles sobre unos 4 °C pero nunca sin llegar a la congelación, desecación o encharcamiento y también sin estar expuestas a la luz durante periodos prolongados.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.2.2. MUESTREO DE FANGOS

- Material de muestreo
  - Anaclín estéril de 500 ml
  - Guantes
  - Roturador para marcaje
  - Nevera
  - Papel de limpieza
  - Mascarilla
  
- Método de muestreo

El muestreo de fangos, se realiza sobre las pilas en las que están acumulados que se encuentran en las proximidades de los campos de cultivo y se realiza mediante un muestreo aleatorio en el que cada miembro de la población tiene las mismas posibilidades de ser seleccionado como sujeto. Se toma una cantidad aproximada de 300 gramos en un anaclín estéril de 500 ml.

Cabe destacar que el Fango 1 es aplicado en la superficie de cultivo arcillosa y es el que permanece más tiempo apilado en las proximidades del campo de cultivo hasta su aplicación, mientras que el Fango 2 es aplicado en la superficie de cultivo arenosa y apenas permanece unas horas en las proximidades de las superficies de cultivo hasta su aplicación.



FIGURA 24. ANACLÍN DE FANGO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- Identificación de muestras, almacenamiento y transporte

Al igual que para las muestras sólidas, para los fangos, la identificación, el almacenamiento y el transporte se realiza en las mismas condiciones y bajo las mismas consideraciones.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.2.3. MUESTREO DE AGUA

➤ Material de muestreo

- Termómetro
- Anaclín 500 ml
- Guantes
- Rotulador para marcaje
- Nevera
- Papel de limpieza

➤ Método de muestreo

El muestreo del agua de riego, tal y como se observa en la Figura 25, se realiza a través de la boca de salida situada en el mismo campo de cultivo. Tras dejar circular el agua durante unos segundos flujo se mide la temperatura de ésta y se recoge en un anaclín estéril de 500 ml.



FIGURA 25. MUESTREO DE AGUAS DE RIEGO. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES

Este procedimiento es igual para los dos campos de cultivo, siendo ambas muestras tomadas de sendas bocas de riego.

➤ Identificación de muestras, almacenamiento y transporte

Al igual que para las muestras sólidas, para las líquidas el marcaje, el almacenamiento y el transporte se realiza en las mismas condiciones y bajo las mismas consideraciones.

### 3.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El trabajo dentro de un laboratorio de microbiología requiere de un orden y una limpieza minuciosa, para poder llevar a cabo los análisis microbiológicos sin riesgo para la salud del personal del laboratorio, ni posibilidad de cometer errores por contaminación de muestras de material de laboratorio.

#### 3.3.1. MUESTRAS DE TERRENOS

Las muestras de terrenos resultan muy difíciles de manipular para su análisis en el laboratorio, por ser una matriz sólida muy heterogénea y compleja.

Por ello, se ha recurrido a bibliografía específica en relación a la metodología para la preparación de este tipo de muestras para su análisis. (Carter, 1993).

#### **OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA DISOLUCIÓN MADRE DE MUESTRAS SÓLIDAS**

Con el fin de asegurar la obtención de resultados repetitivos y reproducibles en una matriz compleja, se procede a un estudio preliminar para determinar la metodología correcta que permite obtener una disolución inicial de la caracterización de las mismas.

Mediante esta comparación se quiere comprobar, a escala de laboratorio, y previamente a la realización de los muestreos en los terrenos, cómo afecta la agitación magnética a los microorganismos presentes, ya que algunos autores plantean que un exceso de agitación puede ser perjudicial para la concentración de patógenos a estudiar (Carter, 1993).

Además también se quiere observar cómo se comporta la composición microbiológica en las dos texturas diferentes de las superficies de cultivo objeto de estudio: arena y arcilla.

Las dos metodologías comparadas para la preparación de las muestras se describen a continuación:

- Para cada textura (arcillosa y arenosa), las cuales se tenían en el laboratorio previamente y que se autoclavan con el fin de conseguir esterilidad, se mezclan con una cantidad determinada de fangos, de la cual se conoce su concentración microbiológica y se extiende en una bandeja previamente autoclavada. Por el método de cuarteo comentado en el apartado “muestreo de muestras sólidas” y bajo una atmósfera estéril se divide hasta seleccionar

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

una porción de 1 gramo de mezcla. Se añade esa cantidad a 10 ml de diluyente, NaCl 0.9% de pureza, en un tubo estéril. Por un lado se agita mecánicamente en un vortex durante 30 segundos (Figura 26). Por otro lado y paralelamente, se agita mecánicamente durante 25 minutos a 3500 revoluciones por minuto (Figura 26).



FIGURA 26. EQUIPOS DE AGITACIÓN. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES

- Se siembra en dos medios de cultivo diferentes, el Coliformes Chromogenic Agar (CCA) y el Slanetz y Bartley (SB), ambos de marca Scharlab, en los que se han analizado diferentes parámetros microbiológicos como son los Coliformes totales y los *Enterococcus* spp.

En las Tabla 15 se muestran las diferencias de los pesos seleccionados para la agitación.

TABLA 15. DIFERENCIAS DE LOS PESOS SELECCIONADOS PARA LA AGITACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

METODOLOGÍA	TEXTURA	PESO FANGOS (GR)	PESO DE TIERRA (GR)	CANTIDAD SELECCIONADA (GR)
AGITACIÓN POR VORTEX	Superficie arenosa	12,286	69,884	1,125
	Superficie arcillosa	8,518	53,344	1,084
AGITACIÓN POR PLACA AGITADORA	Superficie arenosa	12,286	69,884	1,485
	Superficie arcillosa	8,518	53,344	1,588

- Posteriormente se realiza la siembra e incubación de *Escherichia coli*, Coliformes totales y *Enterococcus* spp según la metodología analítica explicada en el apartado 3.4. “Análisis de muestras”.

### **PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

Tanto para los terrenos como para los fangos y para la mezcla de ambas, la preparación de las muestras es igual, independientemente de los parámetros que se analicen.

El primer paso es tamizar la muestra por un tamiz de 5 mm de grosor. El tamiz previamente a su uso es limpiado y desinfectado con isopropanol y expuesto a luz ultravioleta. La parte de la muestra inicial que no pasa por el tamiz es recogida en un anaclín, se marca adecuadamente y guarda en la nevera a una temperatura de 4°C. La parte de la muestra obtenida se vuelve a tamizar por otro tamiz de 2 mm de grosor. La porción que no pasa por el tamiz es recogida en un anaclín, se marca adecuadamente y guarda. La fracción que pasa esta luz de malla es guardada como muestra representativa con la que se trabaja para la obtención de la muestra final.

- Preparación de muestras para análisis de parámetros microbiológicos.

Las muestras para el análisis de los parámetros microbiológicos deben manipularse siempre bajo atmósfera estéril, con el fin de evitar una contaminación cruzada que interfiera en los resultados.

Para los parámetros microbiológicos se pesan aproximadamente 10 gramos de suelo de la muestra tamizada en un recipiente estéril. Se resuspende con 90 ml de PBS (solución tampón empleada en la investigación biológica y bioquímica que contiene cloruro sódico, fosfato sódico, cloruro de potasio y fosfato de potasio) y la solución resultante se introduce en un anaclín estéril junto con un imán estéril para su homogeneización y agitación en una placa agitadora. Se coloca en un agitador mecánico durante 25 minutos a unas 3500 rpm.

- Preparación de muestras para análisis físico químicos

De la muestra final obtenida tras el tamizado se pesan aproximadamente 10 gramos de suelo de la muestra final en un recipiente estéril, se resuspenden con 90 ml de PBS y esta disolución es la muestra a partir de la cual se calculan los parámetros físico-químicos.

Debido a que no se conoce con antelación la concentración microbiológica presente en las muestras a analizar, tal y como se muestra en la Figura 27, es necesario realizar diluciones en serie de la muestra inicial con el fin de que se puedan contar el número de unidades formadoras de colonias (UFC/g).

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



FIGURA 27. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS MADRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Preparación de muestras para análisis de parámetros agronómicos y metales pesados

Tanto los parámetros agronómicos como los metales pesados han sido analizados por laboratorios externos.

#### 3.3.2. MUESTRAS DE AGUA DE RIEGO

Las muestras de agua no necesitan ninguna preparación adicional, puesto que directamente sobre ellas se pueden realizar los análisis microbiológicos y físico químicos. Cuando se procede al análisis de parámetros microbiológicos al no conocerse con antelación la concentración microbiológica presente en las muestras a analizar, es necesario realizar diluciones en serie de la muestra inicial con el fin de que se puedan contar el número de unidades formadoras de colonias (UFC/100ml).

### 3.4. ANÁLISIS DE MUESTRAS

Cabe destacar que debido al análisis de parámetros microbiológicos en el presente trabajo, es imprescindible analizar este tipo de muestras en un plazo inferior a 24 horas desde su recogida y bajo condiciones de esterilidad con el fin de que no se produzcan interferencias en los resultados finales.

#### 3.4.1. PARÁMETROS ANALIZADOS

Los parámetros analizados se han agrupado en físico-químicos, microbiológicos, agronómicos y metales pesados, tal y como se muestran en la Tabla 16.

TABLA 16. PARÁMETROS ANALIZADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

FÍSICO – QUÍMICOS	AGRONÓMICOS	MICROBIOLÓGICOS	METALES PESADOS
pH	Potasio asimilable	<i>Escherichia coli</i>	Cadmio
Conductividad	Proteína bruta	Coliformes totales	Cobre
Carbono Orgánico Disuelto (COD)	Fósforo asimilable	<i>Salmonella spp</i>	Níquel
Demanda Química de Oxígeno filtrada (DQO)		<i>Clostridium spp</i>	Plomo
		<i>Enterococcus spp</i>	Zinc
			Mercurio
			Cromo

Pero debido a que no todos los parámetros son analizados en todas las muestras, a continuación se desglosan cuales se analizan en cada una.

#### MUESTRAS DE TERRENOS.

- Microbiológicos: *Escherichia coli*, Coliformes totales, *Clostridium spp* y *Salmonella spp*
- Físico- químicos. pH, conductividad, COD, DQO
- Agronómicos. Proteína bruta, fósforo asimilable y potasio asimilable
- Metales pesados. Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Mercurio, Cromo

### **MUESTRAS DE FANGOS**

- Microbiológicos: *Escherichia coli*, Coliformes totales, *Clostridium* spp y *Salmonella* spp
- Físico- Químicos: pH, conductividad, COD, DQO
- Agronómicos: Proteína bruta, fósforo asimilable y potasio asimilable
- Metales pesados: Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Mercurio, Cromo

### **MUESTRAS DE AGUAS**

- Microbiológicos: *Escherichia coli*, Coliformes totales, *Clostridium* spp y *Salmonella* spp
- Físico- Químicos: pH, conductividad, COD, DQO

### **MUESTRAS COMPUESTA (FANGOS+TERRENOS)**

- Microbiológicos: *Escherichia coli*, Coliformes totales, *Clostridium* spp y *Salmonella* spp, *Enterococcus* spp
- Físico- Químicos: pH, conductividad, COD, DQO
- Agronómicos: Proteína bruta, fósforo asimilable y potasio asimilable
- Metales pesados: Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Mercurio, Cromo

Los análisis de los parámetros agronómicos y de metales pesados han sido analizados por un laboratorio externo, proporcionándonos directamente el valor promedio de estos parámetros.

En los análisis de parámetros microbiológicos, cada microorganismo ha sido analizado al menos por triplicado.

Los parámetros físico químicos se han realizado por duplicado.

## 3.4.2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE PARÁMETROS

**PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS**

La caracterización microbiológica de los fangos, terrenos, aguas y mezcla de fangos en terrenos, comprende el análisis de los siguientes agentes patógenos: Coliformes totales, *Escherichia coli*, *Salmonella spp* y *Clostridium spp*. Estos parámetros salvo *Salmonella spp* se analizan de forma cuantitativa y *Salmonella spp* y *Clostridium spp*, se analizan en un laboratorio externo.

- Equipos empleados

Los equipos empleados para el análisis de *Escherichia coli* y coliformes totales se muestran en la Tabla 17. Todo el material de vidrio utilizado se esteriliza en autoclave a 121°C y 1 bar de presión durante 15 minutos.

TABLA 17. EQUIPOS DE MEDIDA EMPLEADOS PARA LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

INSTRUMENTO	MARCA	MODELO	FUNCIÓN
ESTUFAS DE CULTIVO	J.P. SELECTA	INCUDIGIT 36L	CULTIVO BACTERIOLOGICO
BAÑO TERMOSTATICO	J.P. SELECTA	PRECISTEM 20 L	MANTENIMIENTO DE MEDIO DE CULTIVO EN ESTADO LIQUIDO
AUTOCLAVE	J.P. SELECTA	41758	ESTERILIZACION DEL MATERIAL
RAMPA DE FILTRACION	MILIPORE	SISTEMA MICROFIL	ANÁLISIS MICROBIOLOGICO
AGITADOR BORTEX	VALP SCIENTIFICA	2X3	MEZCLA DE SOLUCIONES EN TUBOS
MECHERO BUNSEN			CREAR CONDICIONES DE ESTERILIDAD
CABINA DE FLUJO LAMINAR	CRUMA	670FL	ATMOSFERA ESTERIL
CONTADOR DE COLONIAS	INTERSCIENCE	SCAN 100	RECuento DE PLACAS

- Medios de cultivo.

Para la medición de estos parámetros microbiológicos son necesarios medios de cultivo selectivos que proporcionan todos los nutrientes necesarios para el crecimiento microbiano en el laboratorio y se encuentran en forma deshidratada, por lo que deben prepararse las placas en primer lugar para el análisis de dichas bacterias.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Un medio de cultivo es un material nutritivo artificial preparado para el crecimiento de microorganismos. A la hora de cultivar una bacteria determinada y para que ésta crezca adecuadamente, el medio de cultivo debe reunir una serie de condiciones: contener humedad suficiente, un pH ajustado y una concentración conveniente de oxígeno. Además debe contener los nutrientes y factores de crecimiento necesarios y debe ser estéril, es decir, estar exento de todo microorganismo contaminante. En este trabajo se utilizan medios sólidos, que se encuentran en forma de polvo o granular, tal y como se observa en la Figura 28.



FIGURA 28. MEDIO DE CULTIVO EN POLVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para la preparación de estos medios de cultivo, en primer lugar se prepara la cantidad de medio a disolver en función del volumen que se quiere preparar y que depende de cada medio. Posteriormente se añade el volumen de agua ultrapura. La mezcla se lleva a ebullición en una placa agitadora permitiendo la disolución completa del medio en el agua. A continuación, se dispone en botellas con tapón de rosca y se autoclavan a 121°C y 1 bar de presión durante 15 minutos para la esterilización del medio. Tras el proceso de autoclavado, se dejan enfriar hasta una temperatura de 50°C y se vierte en placas Petri.

El medio utilizado para el cultivo de Coliformes totales es el Chromogenic Coliform Agar (CCA) y para el cultivo de *Escherichia coli* es Agar Macconkey. En paralelo al medio CCA, que también da la concentración (UFC) de *Escherichia Coli* al ser un género de Coliformes totales y debido a que se pueden diferenciar ambas bacterias visualmente.

En el Anexo III se recoge la composición de cada una de estos medios de cultivo específicos utilizados para la siembra.

➤ Diluciones

Tanto para muestras sólidas como líquidas, en lo que respecta a la medición de parámetros microbiológicos, por lo que se realizan diluciones en serie de la muestra inicial con el fin de que el crecimiento del Número de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por placa esté en el rango de recuento adecuado. El procedimiento de diluciones seriadas se muestra en la Figura 29.

A partir de la muestra a analizar (dilución 0) se toma 1 ml con micro pipeta y se transfiere a un tubo previamente esterilizado que contiene 9 ml de agua ultra pura al 0.9% NaCl estéril. A continuación se homogeneiza en agitador tipo un vortex, obteniéndose de esta forma la dilución 1:10 o dilución -1 (D-1). Para hacer las diluciones sucesivas, se toma de igual forma 1 ml de la dilución precedente bien homogeneizada y se lleva a un tubo con 9 ml de agua ultra pura al 0.9% NaCl estéril. Se procede de la misma manera hasta obtener varias diluciones seriadas.

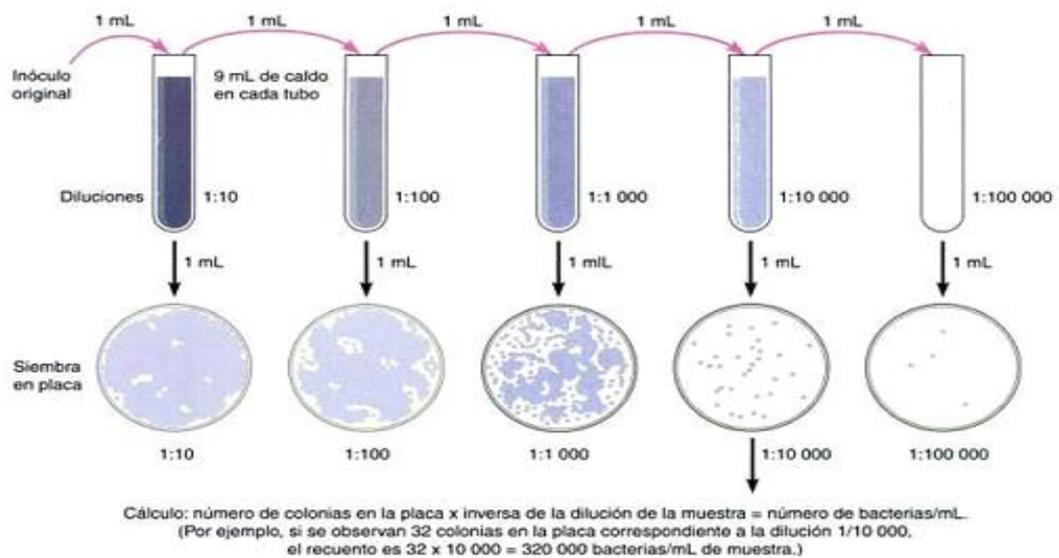


FIGURA 29.PROCEDIMIENTO DE DILUCIONES EN SERIE. FUENTE: ORGANIZACIÓN NACIONES UNIDAS PARA ALIMENTACIÓN Y AGRICULTURA.

Además del método de siembra en superficie se utiliza el método de filtración por membrana – UNE-EN ISO 9308-1: 2014 para *Escherichia coli* y Coliformes totales.

➤ Método de siembra en superficie y filtración en membrana

El cultivo y recuento de Coliformes totales y *Escherichia coli* se realiza siguiendo el procedimiento descrito en la Norma Española UNE-EN ISO 16649-2: “Método horizontal para la enumeración de *Escherichia coli* beta-glucuronidasa positivo”, y el Standard Methods 9215C: “Método de placa difusa” (Eaton et al., 2005). La Norma UNE establece el medio de cultivo empleado, así como las diluciones necesarias para realizar la siembra, y el tiempo de incubación para el crecimiento de los microorganismos objeto de estudio así como las pautas para el posterior recuento.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Por otro lado, el método estandarizado marca el modo de llevar a cabo la siembra en superficie.

La metodología de siembra en superficie que se muestra en la Figura 30 se describe a continuación:

Para llevar a cabo la siembra, en atmósfera estéril siempre requerida para análisis de muestras microbiológicas, se pipetea sobre la superficie del agar dispuesto en la placa el volumen de muestra o de la dilución deseado (20 – 500  $\mu\text{L}$ ) y a continuación se extiende de forma homogénea por toda la superficie de la placa con ayuda de un asa de Drigalsky. Ante el desconocimiento de la concentración exacta de bacterias en la muestra de agua, se siembran varias placas con diferentes volúmenes y diluciones con el fin de asegurar una placa apropiada para el recuento final (Rodríguez Chueca, 2013).

Con el fin de obtener un número de colonias adecuado para el recuento y la reproducibilidad de los microorganismos en el laboratorio, la siembra se lleva a cabo de la siguiente manera: se preparan un total de 6 placas de Petri de 90 mm para cada muestra. Se pipetea 100  $\mu\text{L}$  de cada una de las diluciones decimales preparadas anteriormente (de la más concentrada -1 a la más diluida -3),

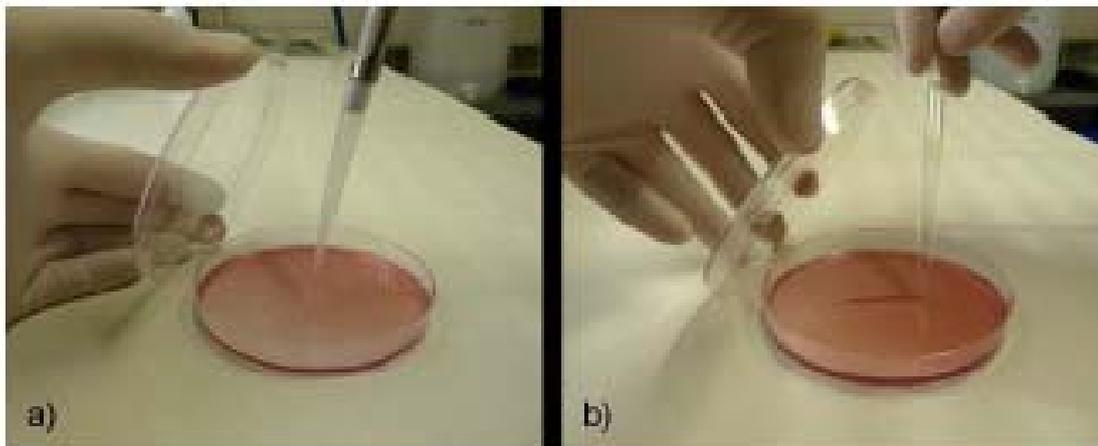


FIGURA 30. SIEMBRA EN SUPERFICIE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El método de filtración por membrana se describe, tal y como se muestra en la Figura 31, en los siguientes pasos:

En presencia de atmósfera estéril proporcionada por un mechero Bunsen con el que se esteriliza el equipo de filtración, mediante pinzas previamente flambeadas, se coloca un filtro de membrana estéril de 0.45  $\mu\text{m}$  de poro sobre el soporte de fijación.

Tras adaptar el embudo estéril en el equipo de filtración, se humedece con una pequeña cantidad de agua ultrapura al 0.9% de NaCl estéril y se vierte el volumen conocido de la dilución, previamente homogeneizada.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Finalmente se retira el embudo y la membrana se coloca sobre el agar solidificado en una placa Petri con diametro de 45 mm, cuidando que no quede ninguna burbuja debajo del filtro.



FIGURA 31. FILTRACION EN MEMBRANA. FUENTE: (RODRIGUEZ CHUECA, 2013)

El método de filtración se utiliza cuando la población bacteriana que se espera detectar es inferior a  $10^4$  UFC/100 ml, mientras que el método de siembra en superficie se utiliza cuando la población esperada es mayor de  $10^3$  UFC/100 ml.

#### ➤ Incubación

El periodo de incubación viene establecido por el método de análisis de cada microorganismo y es el tiempo que debe transcurrir desde la inoculación de la muestra en el medio de cultivo hasta el momento óptimo para el recuento de los microorganismos que hayan crecido en el mismo.

En la Tabla 18 se describen las condiciones en las que han de estar las placas sembradas en la estufa para su incubación y la coloración que presentan tras este periodo.

TABLA 18. TIEMPO DE INCUBACIÓN Y COLORACIÓN CARACTERÍSTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	TIEMPO (Hora)	TEMPERATURA (°C)	COLOR
<i>Escherichia coli</i>	24	42	Rosas
<i>Coliformes totales</i>	18-24	37	Rosas y azules

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### ➤ Recuento

El cultivo y recuento de las bacterias se realiza siguiendo el procedimiento descrito en las normas Española UNE-EN ISO 9308-1:2014 “Detección y recuento de *Escherichia coli* y bacterias Coliformes”.

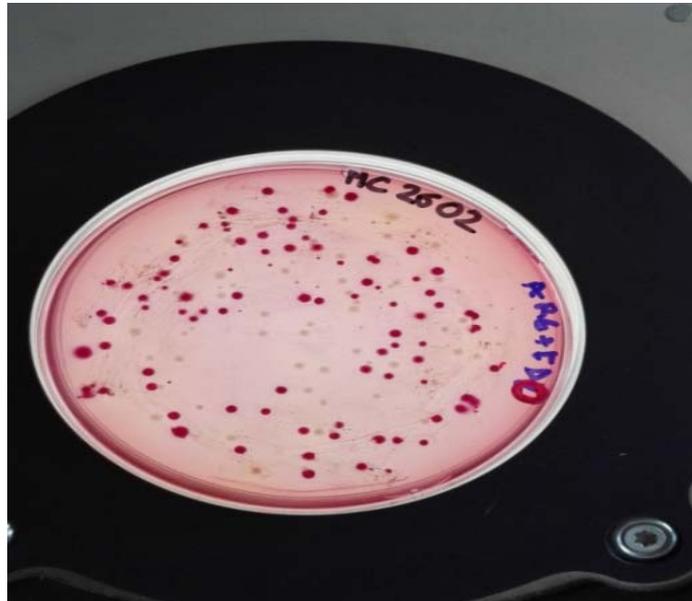


FIGURA 32. RECUENTO DE *ESCHERICHIA COLI* EN MEDIO DE CULTIVO MACONKEY. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Cuando no se detecta ningún microorganismo en las placas sembradas, se considera 1 UFC en 100  $\mu$ L de la mayor de las diluciones realizadas para poder expresar los resultados.

Tras seleccionar las placas con crecimiento adecuado, el recuento bacteriano se obtiene aplicando la ecuación siguiente:

$$\text{UFC}/100 \text{ ml} = \text{UFC}/\text{ml muestra analizados} * \text{Fx} * 100 \text{ ml}$$

Donde Fx es el factor de dilución, es decir, la inversa de la dilución seleccionada

**PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

A modo de resumen, en la Tabla 19, se resumen la metodología de muestreo utilizada para la medición de los parámetros físico-químicos. En el Anexo II, se describen detalladamente la metodología analítica de cada uno de estos parámetros.

TABLA 19. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	MÉTODO	EQUIPO	MARCA MODELO	RANGO	ERROR
pH	4500-HB Standard Methods	pH-metro	CRISON GLP 21	2-16	<0.02
Turbidez	UNE-EN ISO 7027	Turbidimetro Hanna	HANNA Instruments LP2000	0-1000 UNT	0.2 UNT
Conductividad	UNE-EN ISO 27888	Conducti- metro Hanna HI 9033 Multirang e	CRISON Basic 30	0.01-19.999 µs/cm	≤0.5 µs/cm
COD	5310-B Standard Methods	Analizador de TOC	SHIMADZU TOC-Vcsh	TC:0 a 25000 mg/L IC:0 a 30000 mg/L	5-10 %
DQO	5220-d Standard Methods	Fotometro multípara- metrico	Hanna	TB:0 a 150 mg/L RM:0 a 1500 mg/L TA:0 0-15000 mg/L	R.Bajo ±1 mg/L R.Medio ± 1 mg/L R.Alto ±10 mg/L

Leyenda: R.B.: Rango Bajo  
R.M.: Rango Medio  
R.A.: Rango Alto

TC: Carbono total  
IC: Carbono inorgánico

**PARÁMETROS AGRONÓMICOS**

Los parámetros agronómicos, se miden por un laboratorio externo al propio del departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, debido a la falta de equipos especializados para su determinación. En la Tabla 20 se muestran la metodología empleada por el análisis externo para la medición de estos parámetros.

TABLA 20. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN PARÁMETROS AGRONÓMICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETROS	DEFINICIÓN	MEDICIÓN
Proteína Bruta	Estima el contenido en proteínas de una determinada sustancia a partir del contenido en nitrógeno	PNT-LACC/FQ034.
Fósforo asimilable	La fertilidad del suelo en fósforo es la cantidad de fósforo asimilable presente, y entendemos por asimilable, la fracción extraíble con ácidos débiles a una concentración definida	Olsen
Potasio asimilable	Aquel que se encuentra en la solución del suelo, fijado en la superficie de las arcillas y en el complejo arcillo-húmico, interviniendo en el intercambio catiónico	Espectroscopia de absorción atómica de llama

### ANÁLISIS DE METALES PESADOS

La determinación cuantitativa de Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Ni, Pb y Zn en muestras de terrenos y en fangos de depuradora es enviada al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SAI), propio de la Universidad de Zaragoza.

Se ha llevado a cabo la detección de los diferentes metales pesados por Espectrometría de Emisión Atómica con Ionización en Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).

La disolución de la muestra para poder ser analizada se lleva a cabo mediante una digestión ácida asistida por microondas. La mínima concentración determinable (MCD) se calcula como diez veces la desviación estándar de diez lecturas del blanco de medida.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA DISOLUCIÓN MADRE DE MUESTRAS SÓLIDAS

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos tras el estudio de la influencia de la aplicación de las diferentes formas de agitación mecánica, con placa agitadora y vortex, de la muestra final en el estudio de los parámetros microbiológicos.

TABLA 21. RESULTADOS DE LAS DIFERENTES FORMAS DE AGITACIÓN MECÁNICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO MICROBIOLÓGICO	SUPERFICIE	AGITACIÓN POR VORTEX	AGITACIÓN POR PLACA AGITADORA
<i>Enterococcus spp</i> (UFC/g)	FANGO SB	1,09E+08	1,36E+08
	ARENA+F SB	2,97E+06	3,17E+06
	ARCILLA+F SB	5,55E+06	2,27E+06
<i>Coliformes totales</i> (UFC/g)	FANGO CCA	2,16E+06	7,85E+06
	ARENA + F CCA	3,03E+05	3,49E+06
	ARCILLA+F CCA	1,42E+05	1,70E+05

El criterio de selección se ha basado en la máxima recuperación de concentración microbiológica en cada una de las texturas con respecto al fango inicial aplicado.

Para el medio de cultivo SB se observa cómo se obtiene una ligera mayor número de colonias de *Enterococcus spp* cuando se agita mediante placa agitadora, tendencia que no se observa para el medio de cultivo CCA, ya que no sigue ningún patrón específico con respecto a la concentración de Coliformes totales.

Con respecto a la posible diferencia entre las dos texturas analizadas, se observa como tampoco se observa ninguna diferencia significativa respecto a la concentración mostrada en estas muestras, y las pequeñas discrepancias pueden ser debidas a la diferente cantidad de fangos añadidos a cada textura.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La decisión final por uno u otro método debido a que no hay grandes diferencias entre ambos tipos de agitación, se ha basado en la mayor reproducibilidad del método que se consigue con la agitación en placa agitadora ya que permite un mayor control sobre el tiempo y velocidad y permite agitar un volumen superior de muestra.

#### 4.2. CONDICIONES INICIALES PREVIAS AL ABONO Y AL CULTIVO

##### **CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA**

En la Tabla 22 se muestran las concentraciones iniciales los diferentes parámetros microbiológicos en los terrenos arenoso y arcilloso medidos durante el presente trabajo. Se procede a una caracterización inicial por separado para ver las principales diferencias entre ambas.

TABLA 22. VALOR DE LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LAS SUPERFICIE DE CULTIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TEXTURA	PARÁMETRO	VALOR FINAL (UFC/g)
Superficie Arenosa	<i>Escherichia coli</i> (ufc/g)	7,61E+03±7,44E+02
	Coliformes Totales (ufc/g)	3,15E+05+ 0.00E+00
	<i>Clostridium spp</i> (ufc/g)	1.70E+03
	<i>Salmonella spp</i> (/25G)	Ausencia
Superficie Arcillosa	<i>Escherichia coli</i> (ufc/g)	1,48E+04±1,0E+04
	Coliformes totales (ufc/g)	1,21E+04+0,00E+04
	<i>Clostridium spp</i> (ufc/g)	7.10E+02
	<i>Salmonella spp</i> (/25G)	Ausencia

En la Figura 33 se observan las concentraciones de *Escherichia coli*, Coliformes totales y *Clostridium spp* para los dos campos de cultivo.

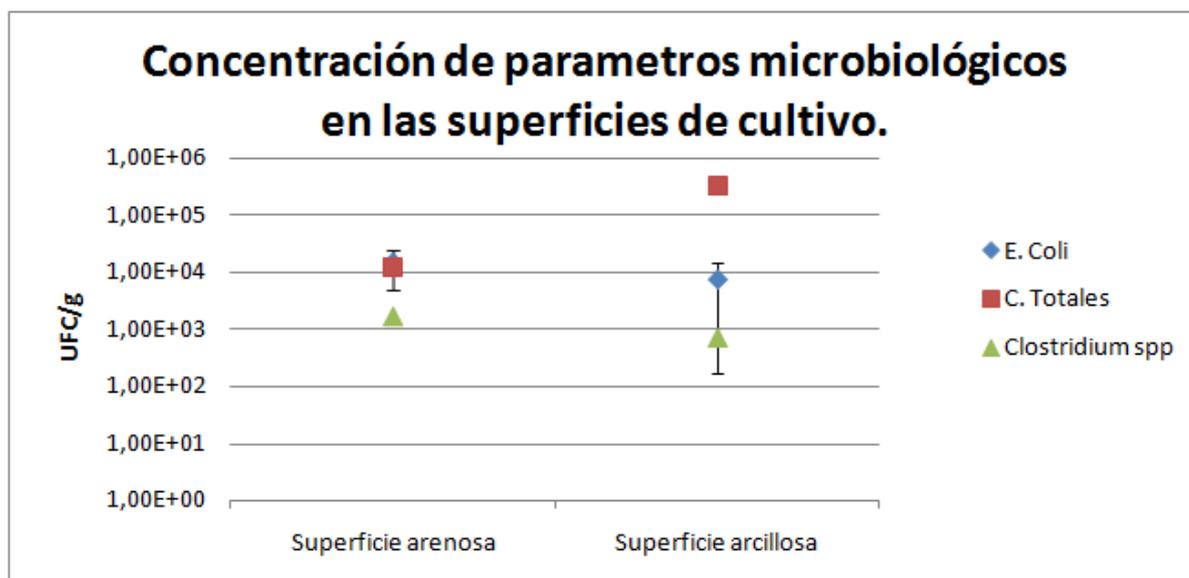


FIGURA 33. CONCENTRACIÓN DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con respecto a los parámetros de Coliformes totales, se observa cómo el terreno arcilloso presenta una concentración notablemente mayor. Sin embargo para *Clostridium spp* y *Escherichia coli* se ve cómo la concentración en ambas superficies de cultivo es muy similar.

Para la *Salmonella spp*, en ninguna de las superficies de cultivo se ha detectado.

#### CARACTERIZACIÓN FÍSICO –QUÍMICA DE LAS SUPERFICIES DE CULTIVO.

Tanto la Demanda Química de Oxígeno filtrada (DQO) como el Carbono Orgánico Disuelto (COD) son indicadores directos de la cantidad de materia orgánica presente. Como se puede ver en la Tabla 23, el terreno arcilloso presenta una concentración mayor de materia orgánica en la superficie arenosa al presentar un valor mayor para ambos parámetros en dicha superficie de cultivo.

TABLA 23. VALOR DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	COD (mg C/L)	pH 18°C	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)
Superficie arenosa	796	14,80	7,10	10,65
Superficie arcillosa	381	11,63	7,01	11,15

Con respecto a los valores de pH en la superficies de cultivo, como podemos observar, ambas superficies, presentan unos valores iniciales cercanos a la neutralidad, ya que

ambos se encuentra muy próximos a un valor de 7. En cuanto a los valores de conductividad en las superficies de cultivo se observa como ambas superficies presentan una conductividad ligeramente similar.

### **CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE LAS SUPERFICIES DE CULTIVO**

En la Figura 34 se muestra el porcentaje de proteína bruta presente en las dos superficies de muestreo. En el terreno arenoso se observa un 0.68 % de proteína bruta, mientras que en el arcilloso estos valores son superiores, presentando un 0.86% de proteína bruta, por lo que se ve como en la superficie arenosa hay una concentración ligeramente mayor de proteína bruta.

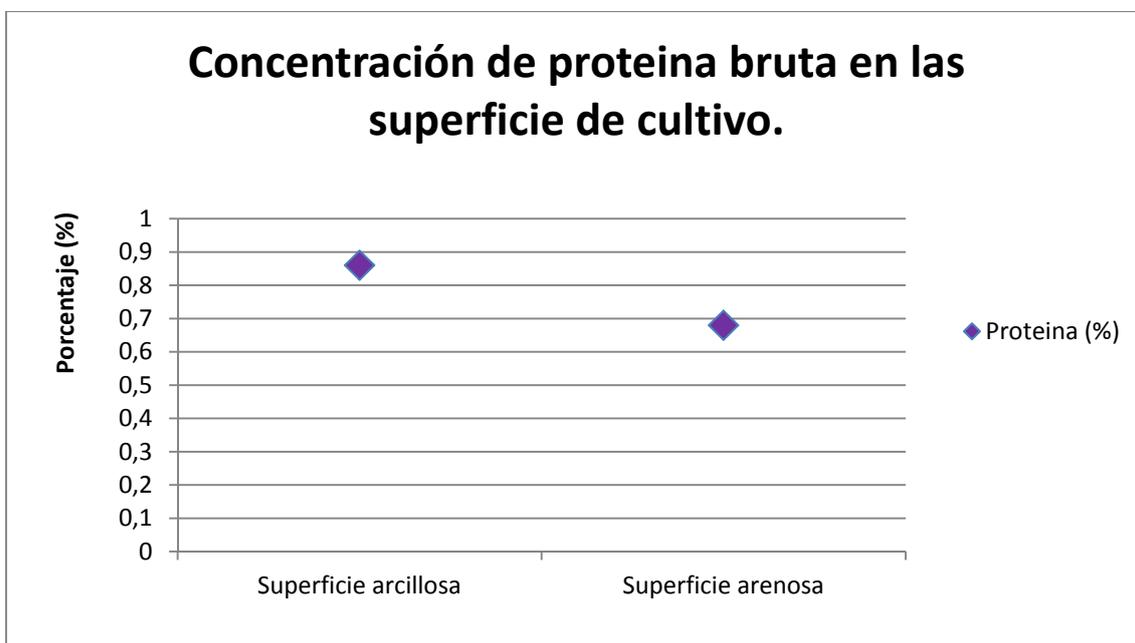


FIGURA 34. CONCENTRACIÓN DE PROTEÍNA EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La Figura 35, muestra los otros dos parámetros agronómicos analizados, que son el fósforo y el potasio asimilable. En ella se observa como presenta un patrón similar que para los anteriores, viendo que el contenido de potasio asimilable es notablemente superior en el terreno arcilloso que en el arenoso, siendo en el primero de 200 mg/kg y en el segundo de 118 mg/kg. Este patrón no se ve reflejado en el caso del fósforo asimilable y aunque las diferencias sean poco relevantes, sí que se ha comprobado cómo el terreno arenoso presenta una concentración ligeramente mayor de este oligoelemento, siendo ésta de 10.49 mg/kg con respecto a los 9.78 mg/kg que ha sido registrado en el terreno arcilloso.

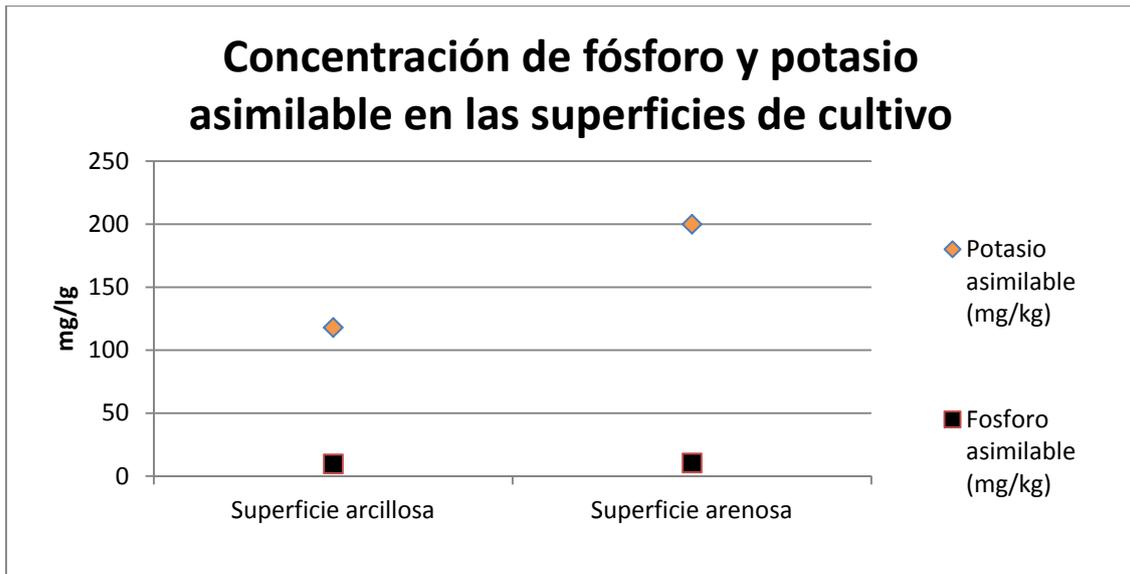


FIGURA 35. CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO Y POTASIO ASIMILABLES EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

## 4.3. FANGOS DE DEPURADORA

**CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA INICIAL DE LOS FANGOS ANTES DE ABONAR**

En la Tabla 24 se muestran las concentraciones iniciales de los diferentes parámetros microbiológicos medidos durante el presente trabajo. Los dos fangos que se han aplicado. El Fango 1, aplicado en la superficie de cultivo arcillosa y el Fango 2 aplicado en la superficie de cultivo arenosa, aunque provienen de la mismas EDAR, han permanecido tiempos diferentes acumulados en el campo hasta su aplicación y presentan diferentes características.

TABLA 24. VALOR DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN LOS FANGOS APLICADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN FINAL (UFC/g)
FANGO 1	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)	2,09E+03±1,55E+03
	Coliformes totales (UFC/g)	3,58E+03±3,38E+03
	<i>Clostridium spp</i> (UFC/g)	2.20E+05
	<i>Salmonella spp</i> (Presencia/25g)	Ausencia
FANGO 2	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)	2,84E+06±0,55E+05
	Coliformes totales (UFC/g)	1,03E+07±0,43E+07
	<i>Clostridium spp</i> (UFC/g)	1.00E+05
	<i>Salmonella spp</i> (Presencia/25g)	Ausencia

En la Figura 36 se observa la concentración de *Escherichia coli*, Coliformes totales y *Clostridium spp* en los fangos aplicados.

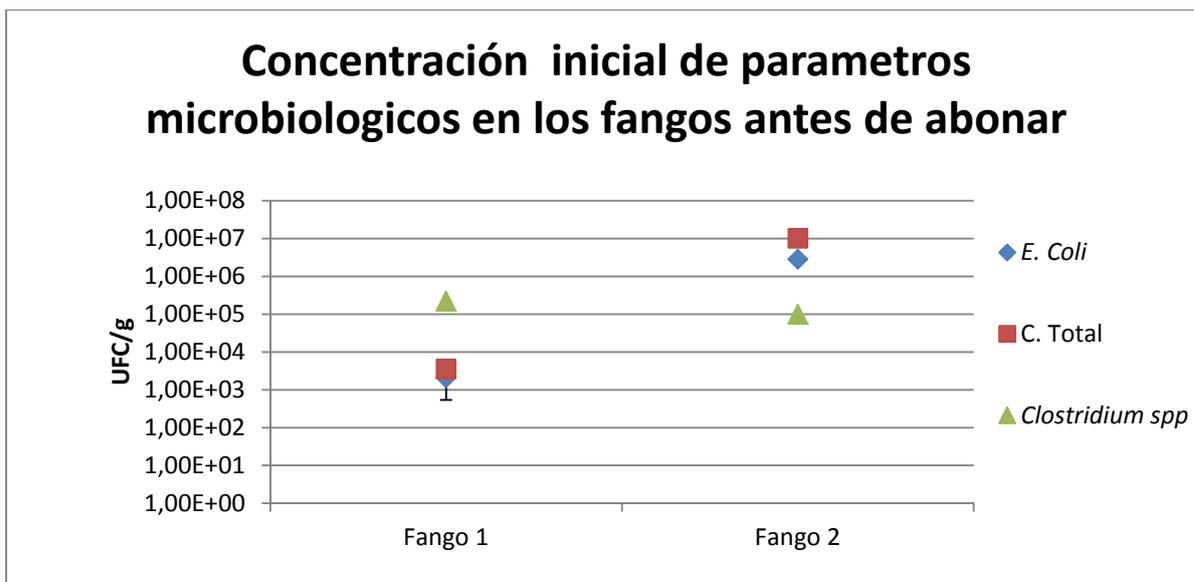


FIGURA 36. CONCENTRACIÓN INICIAL DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LOS FANGOS ANTES DE ABONAR.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el Fango 2 presenta una concentración notablemente mayor tanto de Coliformes totales como de *Escherichia coli* que el Fango 1, con diferencias de hasta tres órdenes de magnitud.

Para el parámetro *Clostridium spp* las diferencias apenas son significativas y aunque el Fango 1 presente una concentración superior a la del Fango 2, se encuentran dentro del mismo orden de magnitud.

No hay presencia de *Salmonella spp* en ninguno de los dos fangos aplicados

### **CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA INICIAL DE LOS FANGOS ANTES DE ABONAR**

En la Tabla 25 se observa el contenido de DQO, COD, pH y conductividad en cada uno de los dos fangos aplicados. Se observa como el fango 1 tiene una concentración notablemente mayor de COD que el Fango 2. Este aspecto es de gran importancia a la hora de la aplicación de los fangos en el cultivo agrícola. Con respecto a la DQO, vemos cómo hay una amplia diferencia entre ambos, ya que mientras el fango 1 presenta una concentración de 5400 mgO<sub>2</sub>/l, el Fango 2 presenta una concentración inferior, siendo esta de 3700 mgO<sub>2</sub>/l.

TABLA 25. VALOR DE PARÁMETROS FÍSICO- QUÍMICOS DE LOS FANGOS APLICADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	COD (mgO <sub>2</sub> )	pH	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)
Fango 1	5400	533,5	6,69	10,64
Fango 2	3700	301,7	6,57	10,03

Para el valor del pH se observa como ambos presentan unos valores próximos de pH, encontrándose ambos por encima de 6.5, esto está en la línea de lo comentado para los terrenos en el apartado de la caracterización de los fangos, ya que, aunque es un valor ligeramente ácido, no se alejan en exceso de la neutralidad. Cabe mencionar que el valor del pH de los fangos es ligeramente inferior al de las superficies de cultivo, por lo que puede inferir en la condiciones de cultivo.

Con respecto a los valores de conductividad ocurre lo mismo, tal y como se ha observado en el estudio de las propiedades de los fangos, la mayoría de los cultivos responden adecuadamente a suelos con valores entre 100 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En nuestro caso en particular la concentración en los fangos aplicados es ligeramente inferior y no va a inducir una excesiva conductividad en los cultivos.

**CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA INICIAL DE LOS FANGOS ANTES DE ABONAR.**

En la Figura 37 se observa como el Fango 1 presenta mayores porcentajes de concentraciones tanto proteína bruta que el Fango 2. Ya que mientras el Fango 1 presenta un 25.92% de proteína bruta, el del Fango 2 es del 21.34%.

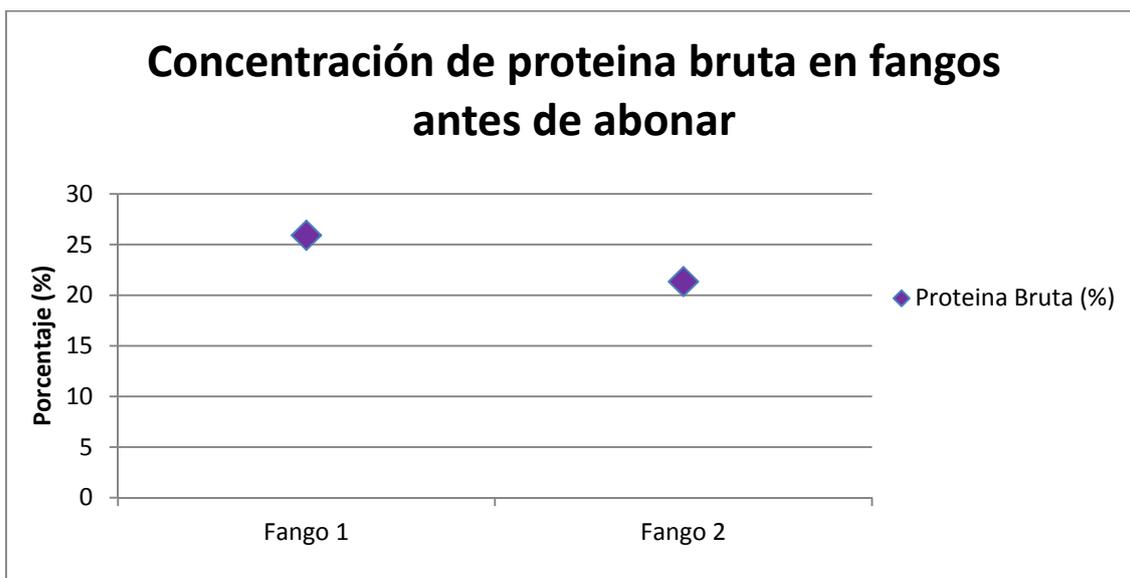


FIGURA 37. CONCENTRACIÓN DE PROTEÍNA BRUTA EN LOS FANGOS ANTES DE ABONAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con respecto al fósforo y potasio asimilable se observa en la Figura 38 como en el Fango 1 la cantidad de potasio asimilable es notablemente mayor que en el Fango 2, ya que mientras el primero presenta un valor de 349 (mg/kg), el del segundo fango es de 292 (mg/kg), esto no ocurre con respecto al fósforo asimilable y aunque la diferencia sea ligeramente menor, el Fango 2 presenta mayor concentración de fósforo asimilable, siendo de 13.25(mg/kg) el primero y de 16.03(mg/kg) el segundo.

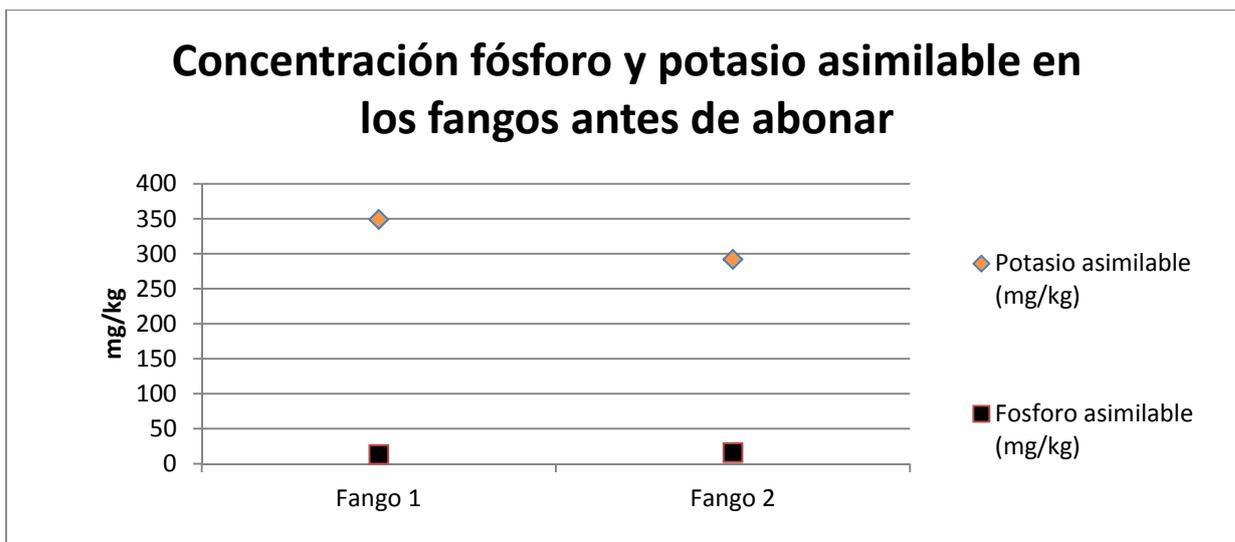


FIGURA 38. CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO Y POTASIO ASIMILABLE EN LOS FANGOS ANTES DE ABONAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observan altas concentraciones de estos parámetros comparados con los detectados en los terrenos inicialmente, por lo que muestra las características agronómicas beneficiosas que se pueden obtener al aplicar fangos en terrenos.

#### **CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS FANGOS ANTES DE ABONAR**

En la Tabla 26 se muestran los resultados de los análisis de metales. Sabiendo que el RD 1310/1990 en su Anexo IB, establece los valores límite de concentraciones de metales pesados en los fangos destinados a su uso agrario. Se analizan en contenido en estos fangos para ver su aptitud para su aplicación en terrenos.

TABLA 26. COMPARACIÓN DE LOS METALES PESADOS DE LOS FANGOS APLICADOS CON LOS LÍMITES LEGALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	LÍMITE (mg/kg m.s)	FANGO 1 (mg/kg m.s)	FANGO 2 (mg/kg m.s)
Cadmio	400	<MCD	<MCD
Cobre	1750	0,136	0,151
Níquel	400	0,042	0,043
Plomo	1200	<MCD	<MCD
Zinc	4000	0,619	0,692
Mercurio	25	<MCD	<MCD
Cromo	1500	<MCD	<MCD

\*<MCD. Por debajo del límite de detección del equipo de medida

Comparando los valores obtenidos con los límites que establece el RD 1310/1990, se observa como la concentración de metales pesados en esta matriz es inferior a las restricciones establecidas, encontrándose todas por debajo del límite legal o por debajo del límite de detección del equipo, por lo que no supone un problema la aplicación de estos fangos como fertilizante agrícola de acuerdo a los límites de la legislación vigente.

#### 4.4. AGUAS DE RIEGO

##### **CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS DE RIEGO**

El agua de riego se caracteriza en las dos bocas de riego de ambos terrenos (arena y arcilla) y en dos muestreos. Siendo el muestreo M2 el realizado en el momento del abonado y el M3 el realizado pasadas varias semanas después del abonado.

TABLA 27. VALOR DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LAS AGUAS DE RIEGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	PARÁMETRO	FINAL (UFC/L)
Agua Superficie arenosa Muestreo M2 (momento del abonado)	<i>Escherichia Coli</i> (UFC/g)	<10.0E+01
	Coliformes totales (UFC/g)	3,50E+02±1,27E+02
Agua Superficie arenosa Muestreo M3 (después del abonado)	<i>Escherichia Coli</i> (UFC/g)	5,71E+01±1,47E+01
	Coliformes totales (UFC/g)	5,00E+02±0,95E+01
Agua Superficie arcillosa Muestreo M2 (momento del abonado)	<i>Escherichia Coli</i> (UFC/g)	<10.0E+01
	Coliformes totales (UFC/g)	4.20E+02±1.98E+01
Agua Superficie arcillosa Muestreo M3 (después del abonado)	<i>Escherichia Coli</i> (UFC/g)	8,33E+00±4.07E+00
	Coliformes totales (UFC/g)	1,90E+02±9.55E+01

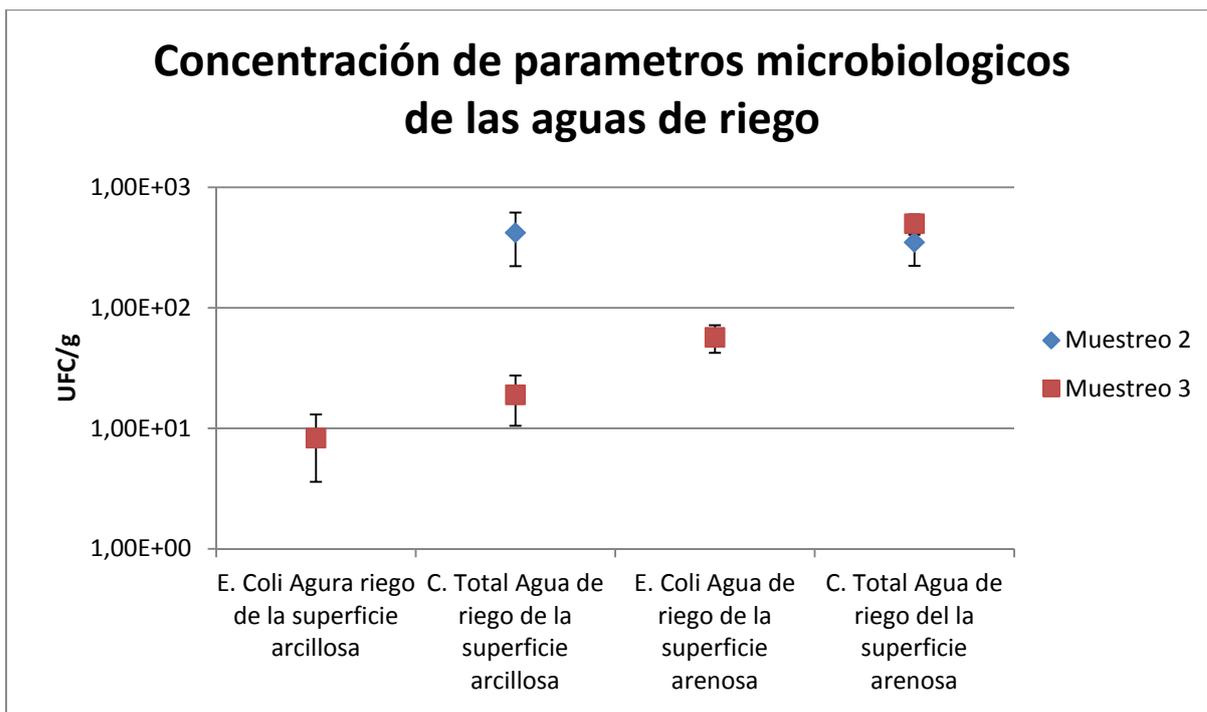


FIGURA 39. CONCENTRACIÓN DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LAS AGUAS DE RIEGO. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA

Se observa en la Figura 39 para el parámetro microbiológico de *Escherichia Coli*, tanto para la superficie de cultivo arenosa como arcillosa, se encuentra una concentración ligeramente mayor en el muestreo M3 (después del abonado) que en el muestreo M2 (en el momento del abonado), mientras que este patrón no se aprecia tan claro para los Coliformes totales ya que, aunque sí que hay mayor concentración de éste en el muestreo M2(en el momento de abonado )de la superficie arenosa, en el de la superficie arcillosa se ve como es ligeramente mayor en el muestreo M3 (después del abonado).

Hay que mencionar también las diferencias de temperaturas encontradas entre ambos muestreos, ya que mientras en el M2 (en el momento de abonado) la temperatura fue de 10 y 11 °C para la superficie arcillosa y arenosa respectivamente, en el muestreo M3 (después del abonado) era de 13.5 y 14°C. Esta diferencia de temperaturas puede influir en la concentración microbiológica en las aguas de riego, ya que a temperaturas más altas, mejores son las condiciones de supervivencia de tales organismos.

Como no se han observado diferencias notables en las aguas de riego analizadas, a pesar de las diferencias de las necesidades hídricas de cada cultivo no se considera relevante la siembra de una u otra especie de variedad agrícola.

#### 4.5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE PARÁMETROS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS.

##### CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DE LOS TERRENOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS.

Conocida la concentración microbiológica inicial, se va a estudiar el efecto que tiene la aplicación de los fangos de depuradora sobre dicha concentración y su evolución temporal.

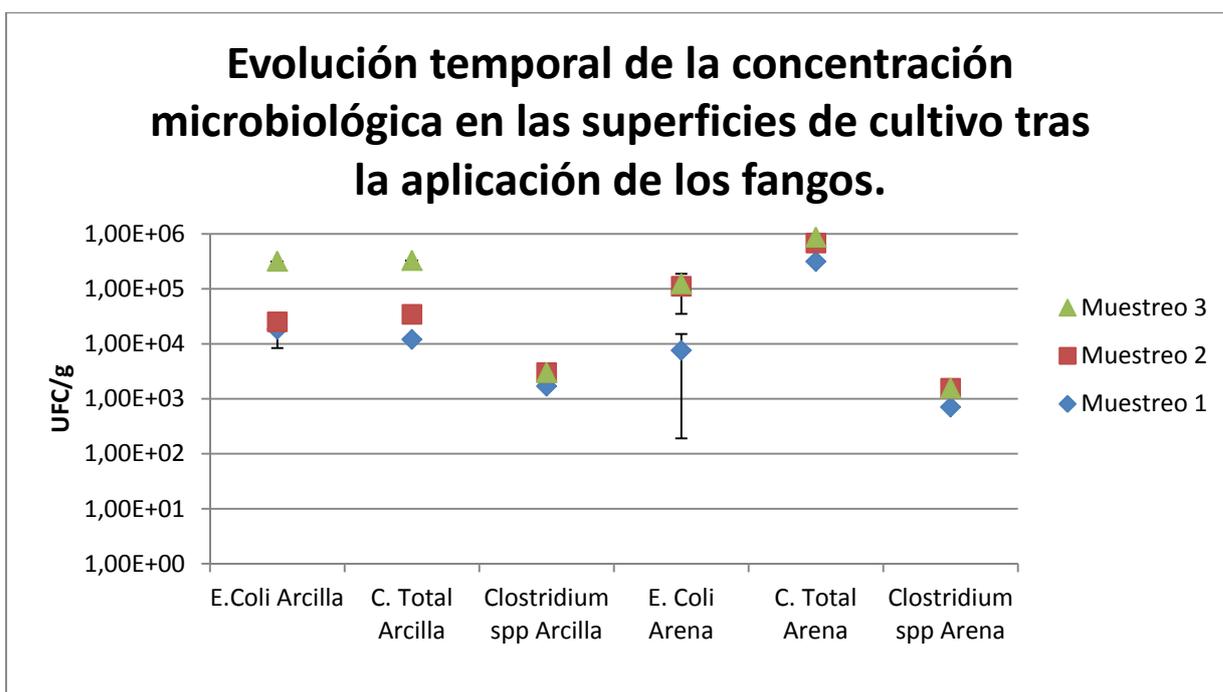


FIGURA 40. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE FANGOS. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que la concentración inicial de *Escherichia coli* sobre el terreno de textura arcillosa, con respecto al segundo muestreo, en el que ya se han aplicado sobre éste los fangos de depuradoras, son similares. Sin embargo si lo comparamos con el tercer muestreo, sí que se observa como se ha incrementado ligeramente la concentración del patógeno un orden de magnitud. Esta tendencia se observa también en la superficie de cultivo arenosa para este parámetro, ya que también se incrementa ligeramente un orden de magnitud la concentración en el tercer muestreo respecto al primero.

Los Coliformes totales no muestran una tendencia específica, ya que mientras para el terreno arcilloso sí que se observa como en el tercer muestreo se ha incrementado ligeramente la concentración de tal patógeno en un orden de magnitud con respecto al primer muestro sobre el terreno inicial, en el terreno arenoso no se observa este

incremento de concentración proporcionado por los fangos, sino que se mantiene un valor similar, del mismo orden de magnitud, en los tres muestreos realizados.

Para el parámetro microbiológico *Clostridium spp*, no se observa diferencia entre el muestreo M1 (antes del abonado) y el muestreo M3 (después del abonado), ya que ambos presentan una concentración similar de UFC/g, estando en ambos muestreos dentro de un mismo orden de magnitud.

La *Salmonella spp* no se detecta tras la aplicación de los fangos sobre ambos cultivos agrícolas es la Salmonella, por lo que no suponen un problema de cara a una carga microbiológica de los fangos aplicados.

#### **CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS TERRENOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS.**

Sabiendo la concentración inicial de pH, tanto en los fangos de depuradora aplicados, como en las superficies de cultivo ámbito de estudio, se estudia la evolución de este parámetro a lo largo del tiempo.

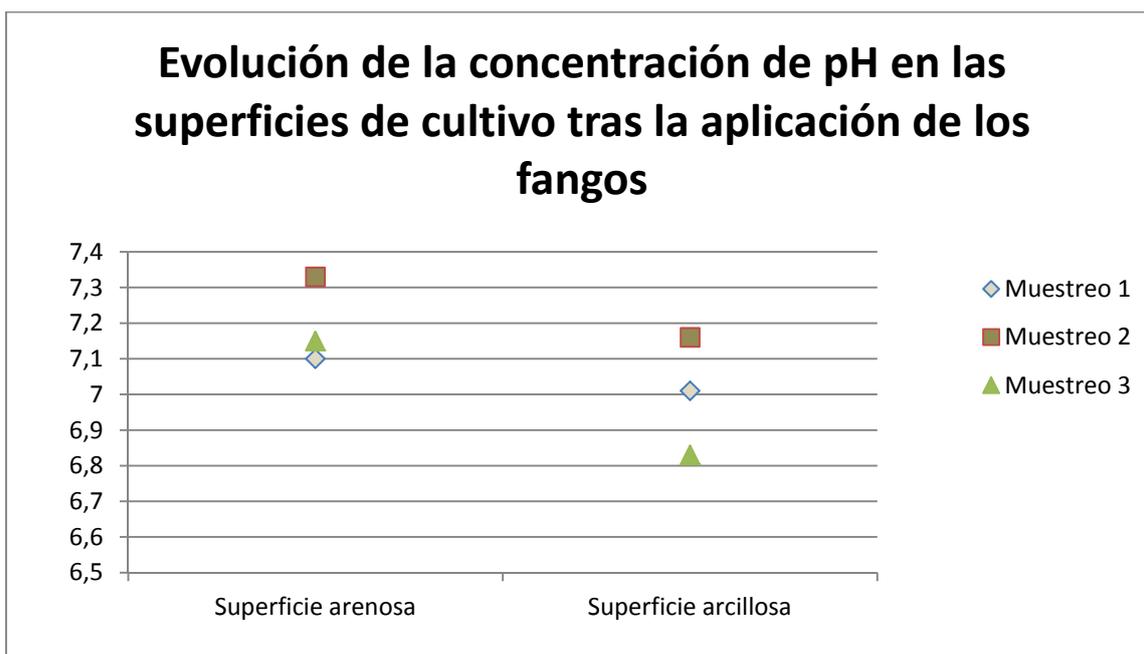


FIGURA 41. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PH EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Viendo la evolución, para la superficie arcillosa, con un pH inicial de 7.01, en el segundo muestreo (M2), se observa un valor en el del tercer muestreo de 6.83. Por lo que se ve como se ha producido una ligera disminución final del valor del pH. Sin embargo, para la superficie de cultivo arenosa y a pesar de que la tendencia es similar al de la superficie con textura arcillosa, partiendo de un pH de 7.10, se observa un valor final de 7.15. Por lo tanto, no se ha reducido el valor final con respecto al pH inicial del terreno, tal y como si ocurre para la superficie arcillosa.

Esto puede ser debido al estar la superficie arcillosa cultivada con girasol que necesita menor aporte de agua de riego que la superficie arenosa que esta cultivada con maíz, cuya demanda de agua de riego es superior y como el pH de las aguas es superior, cuando se ha aplicado mayor concentración de agua se ha mantenido estable y cuando se ha regado menos, se ha disminuido ligeramente su concentración.

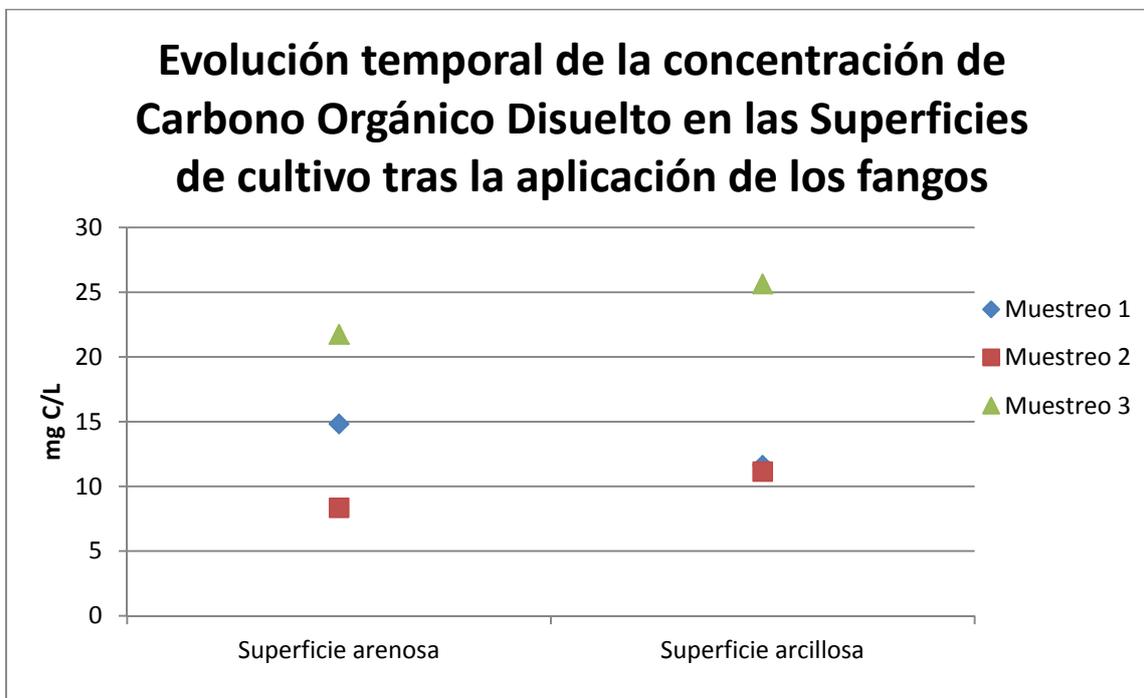


FIGURA 42. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se observa en la Figura 42 en la que se muestra evolución del carbono orgánico en ambas superficies de cultivo, este parámetro sigue una tendencia similar en el tiempo en ambas superficies de cultivo, ya que tras la aplicación de los fangos de depuradora se observa como con el tiempo se ha incrementado ligeramente la concentración final de este parámetro de forma destacable. Esto es esperable ya que la concentración en los fangos es mucho mayor que en la superficie de cultivo inicial, por lo que su adición conlleva un incremento en la mezcla final

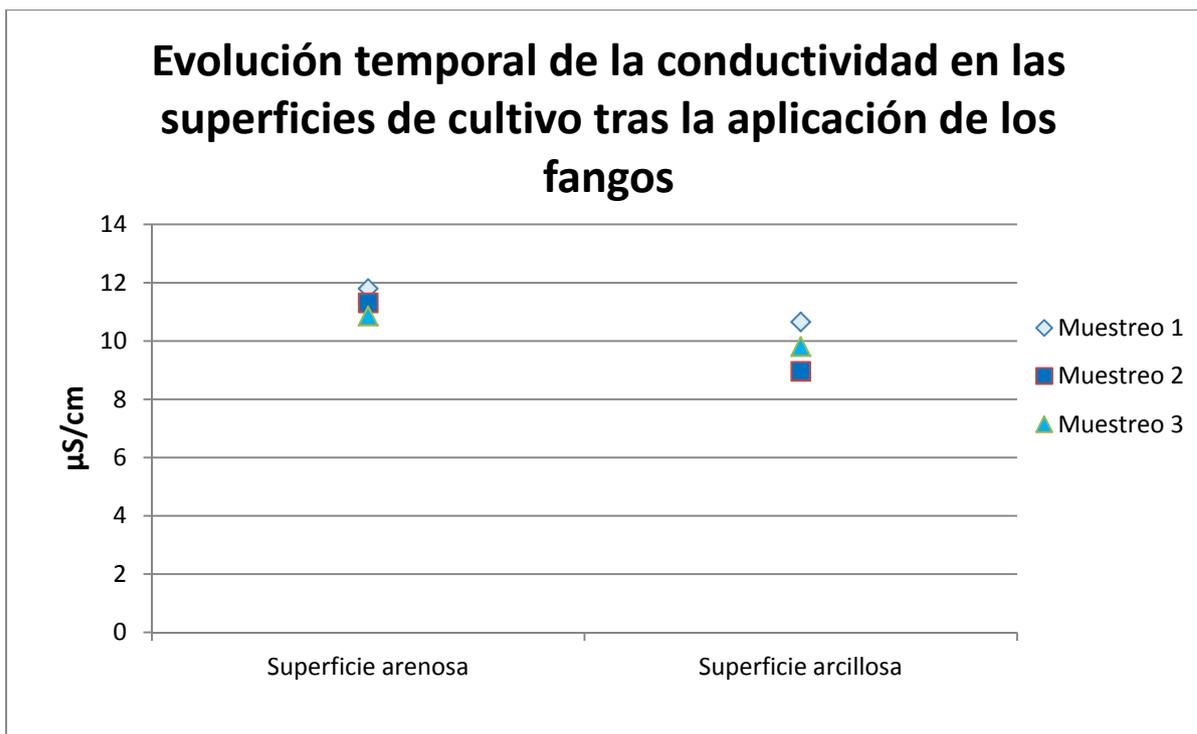


FIGURA 43. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Observando los valores de la conductividad mostrados en la Figura 43 a lo largo de los diferentes muestreos, se observa como apenas hay diferencias significativas entre los tres muestreos realizados, y aunque sí que se observa un ligero incremento en su concentración en los muestreos sucesivos, esta diferencia es muy pequeña, pudiendo ser debida al riego.

#### **CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE LOS TERRENOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS.**

A continuación se va a estudiar la evolución temporal de la concentración de los parámetros agronómicos, con el fin de ver el impacto que tiene la aplicación de los fangos de depuradora sobre dicha concentración.

La Figura 44 muestra la evolución de la concentración de proteína bruta tras la aplicación de los fangos. Con respecto a la proteína bruta, se ha observado como el valor para la superficie de cultivo arcillosa, partiendo de un valor inicial de 0.86% antes de que se iniciara el abonado con los fangos, en el segundo muestreo presentó una concentración de 0.87% y en tercer muestreo se vio que se había reducido notablemente hasta un valor de 0.8%, por lo que a pesar de que se añadieron los fangos que presentan una mayor concentración no se ha encontrado un porcentaje superior en los muestreos sucesivos. Esto mismo ocurre para la superficie de cultivo arenosa, como se puede apreciar en la Figura 44.

Ese incremento inicial y su posterior descenso pueden ser debido al valor nutricional aplicado por los fangos y que una vez aportado es aprovechado por la planta como elementos nutricionales.

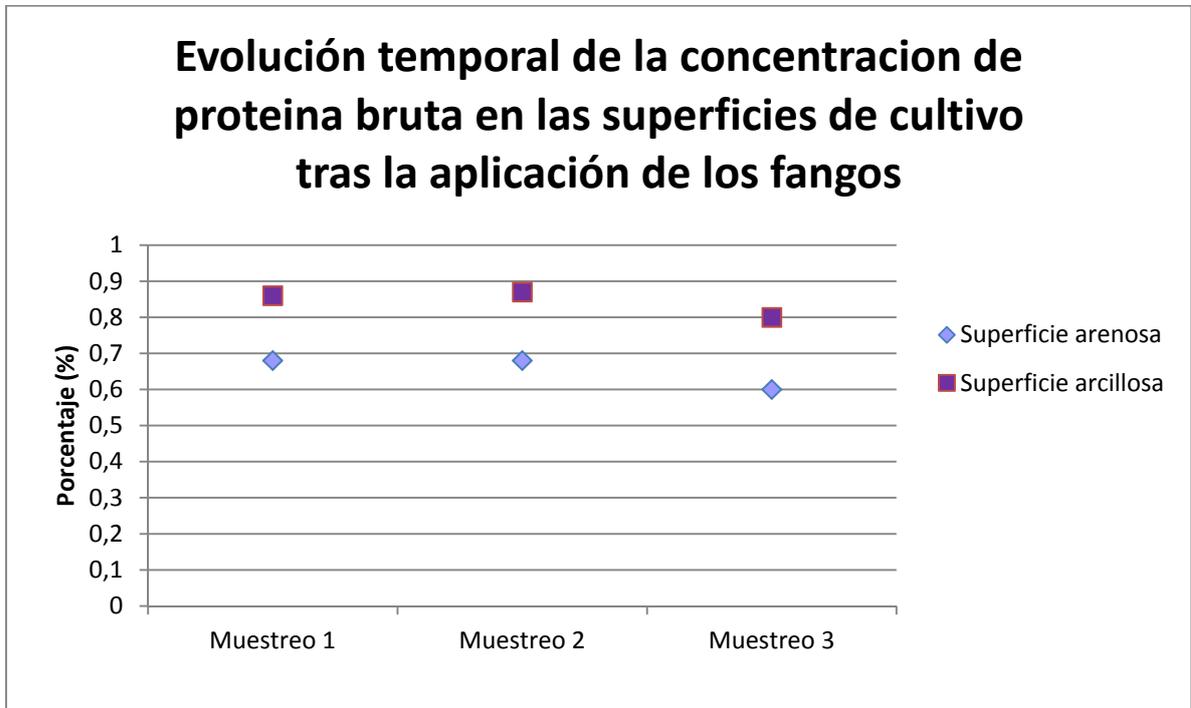


FIGURA 44. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PROTEÍNA BRUTA EN LAS SUPERFICIES DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

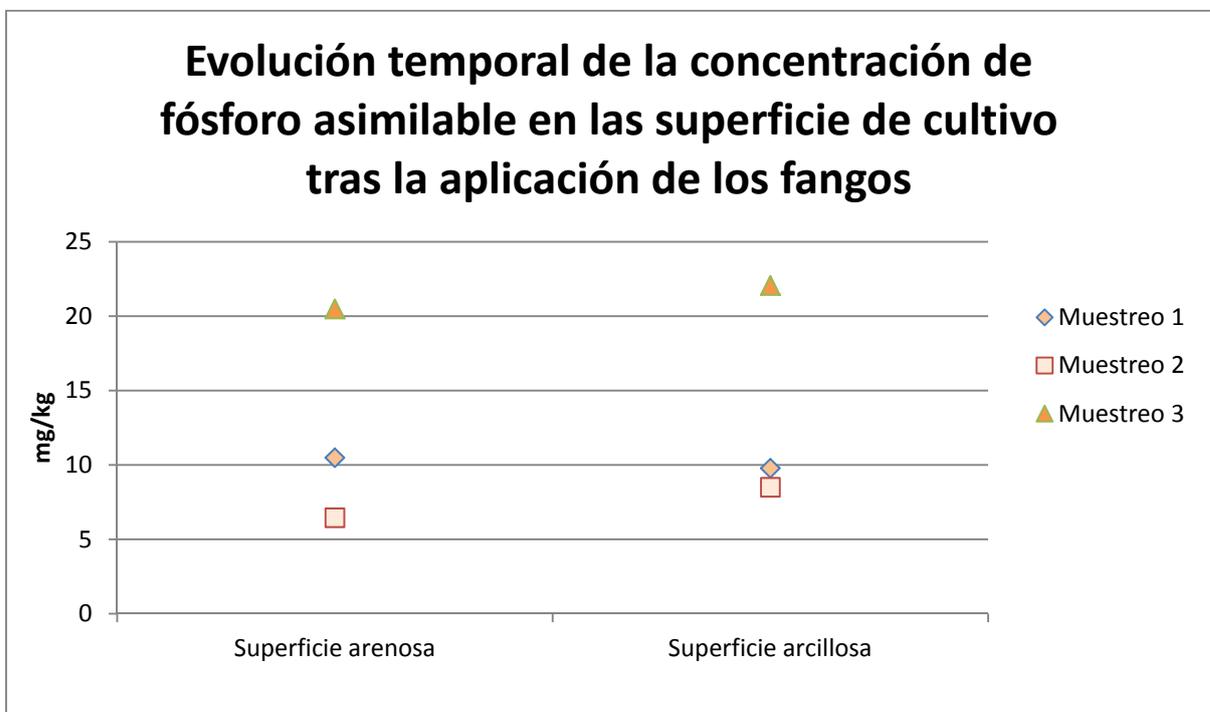


FIGURA 45. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO ASIMILABLE EN LAS SUPERFICIE DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que tras la aplicación de los fangos de depuradora que la superficie de cultivo arcillosa el valor inicial de la superficie de cultivo era de 9.78 (mg/kg), manteniéndose un valor similar en el muestreo M2 (momento del abonado) e incrementado hasta un valor de 22.07 (mg/kg) en el tercer muestreo (varias semanas después del abonado). Por lo tanto se aprecia un aumento notable de la concentración de este parámetro sobre la matriz a analizar con el paso del tiempo. Esta tendencia se observa de igual manera para la evolución de fósforo asimilable mencionada para la superficie de cultivo con la textura arenosa. Se observa como partiendo de un valor inicial de 10.49 (mg/kg) en el muestreo M1 (antes del abonado), se pasa a un valor de 6.45 (mg/kg) en el muestreo M2 (en el momento de abonar) y de 20.49 (mg/kg) en el muestreo M3 (después del abonado). Viéndose también un incremento notable con el paso del tiempo mencionado con anterioridad para este parámetro agronómico.

Esto está en la línea de lo descrito anteriormente en los efectos de la aplicación en la superficie de fangos en agricultura, ya que el fósforo en los fangos puede estar presente como fósforo orgánico o como sales inorgánicas insolubles del mismo, siendo ambas de muy lenta asimilación en los terrenos.

En el estudio de la evolución del potasio asimilable presente en las superficies de cultivo (Figuras 46). Para la superficie de cultivo arenosa, se observa un ligero aumento de la concentración con el paso del tiempo, observándose que conforme se realizan los muestreos sucesivos, mayor concentración se encuentra en la matriz analizada

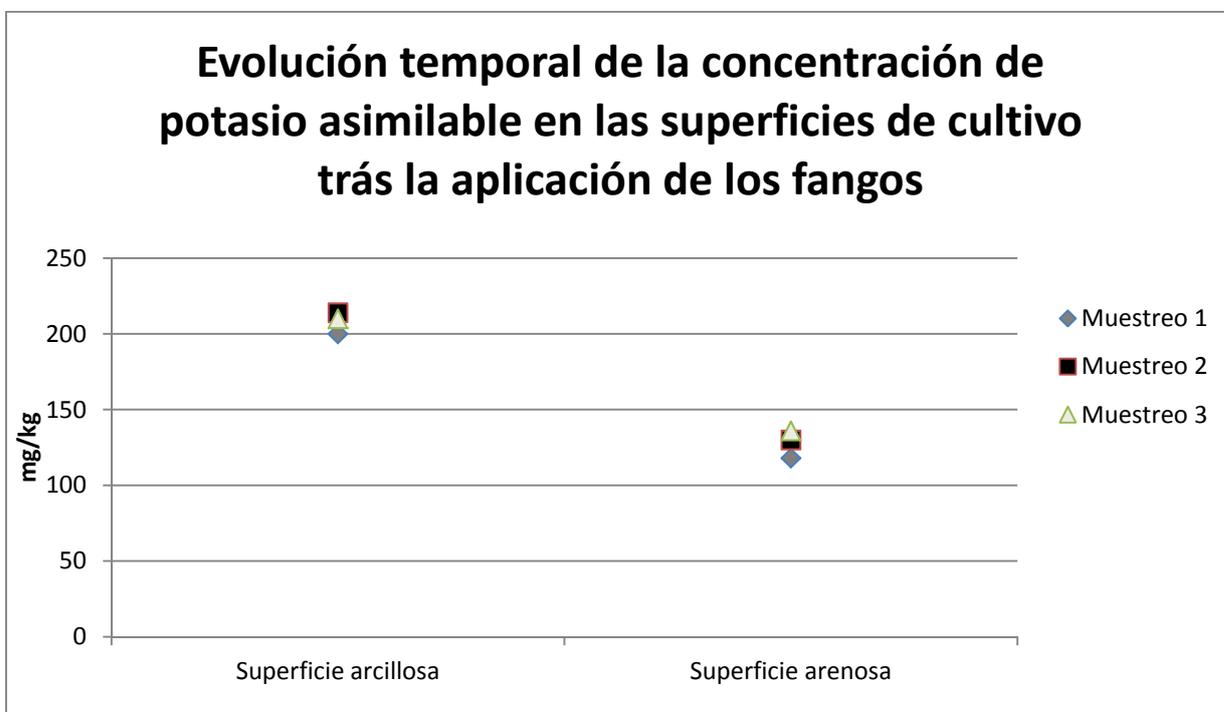


FIGURA 46. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POTASIO ASIMILABLE EN LAS SUPERFICIE DE CULTIVO TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Mientras que para la superficie de cultivo arcillosa, la evolución no sigue el mismo patrón, y aunque sí que se observa un aumento de la concentración analizada en el muestreo M2 (en el momento del abonado), con respecto al muestreo M1 (antes del abonado), pasando de una concentración de 200 mg/kg a 214 mg/kg, la concentración observada en el muestreo M3 (después del abonado), aunque sigue siendo superior a la del muestreo M1, no excede a la del muestreo M2, siendo el valor final de 210 mg/kg. Esto está de acuerdo con que la aplicación de los fangos de depuradoras ha incrementado el valor de este micronutriente en el suelo, pero con el paso del tiempo, esta concentración es reducida por el consumo de la vegetación agrícola cultivada.

#### **CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS TERRENOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS FANGOS**

Una vez aplicados estos fangos sobre las superficies agrícolas tampoco se han de superar unos valores límites que establece el Real Decreto 1310/1990 en su Anexo IA, con respecto a la concentración de metales pesados en los suelos.

TABLA 28. COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS ANALIZADOS RESPECTO A LOS LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA LEGISLACIÓN VIGENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	LÍMITE (mg/kg m.s)	ARCILLA INICIAL (mg/kg m.s)	ARENA INICIAL (mg/kg m.s)	ARCILLA FINAL (mg/kg m.s)	ARENA FINAL (mg/kg m.s)
Cadmio	400	<MCD	<MCD	<MCD	<MCD
Cobre	1750	<MCD	<MCD	<MCD	<MCD
Niquel	400	0,059	0,030	0,034	0,032
Plomo	1200	<MCD	<MCD	<MCD	<MCD
Zinc	4000	0,046	0,046	0,051	0,045
Mercurio	25	<MCD	<MCD	<MCD	<MCD
Cromo	1500	<MCD	<MCD	<MCD	<MCD

\*<MCD. Por debajo del límite de detección del equipo de medida

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa como los valores analizados en las superficies de cultivo tras la aplicación de los fangos, no han superado en ningún caso la concentración límite establecida por el Real Decreto 1310/1990.

En la legislación vigente se establecen límites de concentración de metales pesados que se podrían introducir en los suelos basándose en una media de 10 años.

TABLA 29. COMPARACIÓN DE METALES PESADOS ANALIZADOS EN LOS FANGOS RESPECTO AL ANEXO IC DEL RD 1310/1990 . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	LÍMITE (mg/kg m.s)	FANGO 1 (mg/kg m.s)	FANGO 2 (mg/kg m.s)
<b>Cadmio</b>	0.15	<MCD	<MCD
<b>Cobre</b>	12	0,136	0,151
<b>Níquel</b>	3	0,042	0,043
<b>Plomo</b>	15	<MCD	<MCD
<b>Zinc</b>	30	0,619	0,692
<b>Mercurio</b>	0.1	<MCD	<MCD
<b>Cromo</b>	3	<MCD	<MCD

\*<MCD. Por debajo del límite de detección del equipo de medida

Los resultados muestran que en ningún caso se ha superado el valor límite de las cantidades anuales de metales pesados que se podrían introducir basándose en una media de 10 años. Es esperable ya que los fangos aplicados no tenían o tenían una concentración muy baja de los metales pesados analizados

## 5. CONCLUSIONES

Tras la realización de este trabajo se obtienen las siguientes conclusiones.

### **OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA DISOLUCIÓN MADRE DE MUESTRAS SÓLIDAS**

Se considera que el tipo de agitación mecánica utilizada no tiene una clara influencia sobre los resultados finales, sin embargo sí que se ve como la agitación en una placa agitadora en algunos casos presenta una mayor recuperación de la concentración microbiológica inicial respecto al método de agitación mecánica mediante vortex.

La decisión final sobre la elección del método se ha basado en que el método de agitación mecánica mediante placa agitadora es más reproducible, teniendo mayor control sobre el tiempo y velocidad, además de permitir agitar un mayor volumen de disolución.

### **CARACTERIZACIÓN MICROBIOLOGIA**

Comparando la concentración inicial tanto de los terrenos, como de los fangos y de las aguas de riego, se observa que ésta es notablemente mayor en los fangos.

Mientras en la superficie arcillosa se ha mostrado mayor concentración de Coliformes totales que en la arenosa, esto no se observa para la *Escherichia coli* ni *Clostridium spp*, que presentan una concentración similar para ambas superficies. Con respecto a la *Salmonella spp*, no se observa la presencia de este parámetro microbiológico en ninguna de las superficies de cultivo.

Hay diferencias destacables entre la concentración microbiológica de ambos fangos. El Fango 1 permanece adyacente a la superficie de cultivo durante 18 días hasta la aplicación en las superficies de cultivo, mientras que el Fango 2 es transportado hasta el lugar de aplicación el mismo día de su aplicación. Esto se refleja en los resultados ya que el Fango 1 presenta mayor concentración de Coliformes totales y *Escherichia coli*. Las de *Clostridium spp* son muy similares en ambas matrices y las de *Salmonella spp* está por debajo del límite de detección.

Si se observa la evolución de la mezcla en el tiempo se aprecia cómo tras la aplicación de los fangos y del agua de riego hay un aumento de la concentración Coliformes totales, mientras que el resto de los parámetros microbiológicos como son la *Escherichia coli*, *Clostridium spp* y *Salmonella spp*, su concentración se han mantenido constante. Esto está en la línea de lo esperado ya que al añadir directamente esta matriz sobre los terrenos de cultivo, conlleva un ligero incremento de la concentración microbiológica que puede ser incorporada a los terrenos cultivados.

### **CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

Con respecto al valor del pH, se observa como las aguas de riego presentan mayor valor de pH que los terrenos analizados y los fangos aplicados. Siendo el valor de pH de los fangos inferior también a las de las superficies de cultivo.

Viendo la evolución del pH se observa como para la superficie arcillosa ha disminuido ligeramente su valor, mientras que para la superficie arenosa ha aumentado. Esto puede tener relación con la cantidad de agua aplicada para el riego, siendo la demanda de ésta por parte del girasol que se sitúa en la superficie arcillosa bastante inferior a la del maíz que se ubica en la superficie arenosa

La concentración de materia orgánica, que viene determinada tanto por el COD, como por la DQO, es notablemente superior en los fangos que en la superficie de cultivo y las aguas de riego. Presentando el Fango 1 una mayor concentración que el Fango 2.

Se observa cómo tanto para la superficie de cultivo arcillosa como para la arenosa se ha producido un importante incremento en la materia orgánica presente.

Con respecto a la conductividad, tanto los fangos aplicados, las aguas de riego, como las superficies de cultivo, presentan una concentración similar. Viéndose también cómo la evolución de este parámetro físico químico apenas varía tras los sucesivos muestreos en ninguna de las superficies de cultivo analizadas.

### **CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA**

Se observa como la concentración de los parámetros agronómicos es superior en los fangos aplicados que en las superficies de cultivo. En concreto, sobre el terreno arcilloso se presenta una mayor concentración inicial de proteína bruta y potasio asimilable, tendencia que no se observa con el fósforo asimilable siendo éste mayor en la superficie de cultivo arenosa.

Los parámetros agronómicos en los fangos, muestran una mayor concentración de proteína bruta y potasio asimilable en el Fango 1, a pesar de que permaneció más de un mes expuesto a las condiciones naturales del medio. La concentración de fósforo asimilable es mayor en el Fango 2.

En el transcurso de los muestreos se observa cómo tanto para la proteína bruta como para el fósforo asimilable se produce una disminución para ambas superficies de cultivo, la cual es más destacable en el caso del fósforo. Esta tendencia no se observa para el potasio, ya que su concentración se mantiene constante con el transcurso de los muestreos para ambas superficies de cultivo.

### **CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS**

La concentración de metales pesados es mucho menor que los límites legales que establece el Real Decreto 1310/1900 en sus anexos IA, IB y IC, por lo que la incorporación del fango al terreno bajo este criterio no supone un problema.

Por lo tanto, la aplicación de los fangos en los cultivos agrícolas en las superficies de cultivo no producen consecuencias negativas notables con respecto a los parámetros microbiológicos, físico químicos, agronómicos ni de metales pesados. De manera que su aplicación en los cultivos agrícolas, recomendada por las nombradas directivas tanto europeas como estatales, con el fin de la reutilización de tal residuo como son los fangos de depurados ha permitido una excelente producción de ambos cultivos agrícolas.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Acosta Gonzalez, Y., Edixon, G., & Edicio, R. *Poder Fertilizante de los Lodos Residuales Provenientes del Tratamiento de Aguas Servidas*. Maracaibo: Universidad del Zulia.

Alianza por el agua. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales*. El Salvador.

Añon, A. M. (2012). *Digestión aerobia termofílica autosostenida en dos escenarios con higienización y diferentes grados de estabilización*. Ingeniería Civil.

Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., & Fernandez del Cerro, R. (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores*. Oxaca: Asociación Española de Ecología Terrestre.

Bermudez, F. G. (1997). *Aplicación agronomica de lodos residuales a suelos en ambientes semiáridos y sus efectos sobre las propiedades físico-químicas del suelo*. Lleida: Universidad de Lleida.

Carter, M. R. (1993). *Soil Sampling and Methods of analysis*. London: Lewis Publishers.

Cisneros Lainez, L. (2015). *Evolución de contaminantes físico-químicos y microbiológicos durante el proceso de depuración de aguas residuales urbanas*. Huesca: Universidad de Zaragoza.

Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio, D. G. del Medio Ambiente. (2005). *Plan Regional de Lodo de Depuradoras (2006-2016)*. Madrid.

Cruz, A. M. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Pachuca de Soto.

Escobar Rivera, J., Silva Leal, J. A., & Torres Lozada, P. (2007). *Identificación de hongos fitopatógenos y presencia de Salmonella spp en compost de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Oviedo.

European Comision. (2001). *Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction*. Luxemburgo.

European Commission. (1995). *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land*. Bruselas.

FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma.

Fundación Vasca para la seguridad agroalimentaria. (2013). *Salmonella*. Bilbao.

García Ganuza, J., Gomez Muñoz, J., Lasheras Añon, A. M., & Sobrados Bernardos, L. (2010). *Criterios para la aplicación de fangos de depuradoras en suelos: estabilidad e higienización*. Tudela.

García Izquierdo, C. (2007). *Control analítico para la aportación de lodos de depuración al suelo*. CEBAS-CSIC.

Gobierno de Aragón. Departamento de Medio Ambiente. (2009). *Plan Integral de Residuos en Aragón 2009-2015*. Zaragoza.

Gobierno de Navarra. Departamento de desarrollo rural y de Medio Ambiente. (2008). *Inventario de residuos 2008. Lodos de depuradoras Urbanas*. Pamplona.

Gondim Porto, G. (2013). *Análisis microbiológico de un suelo agrícola mediterráneo tras la aplicación de lodos de depuradora urbana*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas. (2016). *Estudio Microbiológico en los fangos de EDARs*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

Instituto Nacional de Innovación y transferencia agropecuaria. (2009). *Manual de Recomendaciones Técnicas cultivo maíz*. San José.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. (2013). *Ascaris lumbricoides*.

Laboratorio experimental del departamento de ingeniería civil y minas. (2003). *Reducción de muestras por el método de cuarteos*. Hermosillo: Universidad de Sonora.

Laborda Larrodé, E. (2013). *Estudio para la reutilización del efluente de una estación depuradora de aguas residuales en el riego de maíz*. Escuela Politécnica Superior de Huesca.

Lares Mena, J. G. (2007). *Cuantificación de Salmonella spp. durante el proceso de secado solar de los generados en plantas tratadoras de aguas residuales*. Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez.

Larraya Astibia, J. M. (2011). Los climas de Navarra: diversidad y localización. *Publicación digital de Historia y Ciencias Sociales*.

Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (2016-2020)*. Madrid.

Ministerio de agricultura, alimentación y Medio Ambiente. (2013). *Programa Estatal de Prevención de Residuos*. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente. (2008). *Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015*. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente y medio rural y marino. (2009). *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente y medio rural y marino. (2012). *Guía de campo para el control de la aplicación de lodos de depuradora de aguas residuales en el sector agrario*. Madrid: Fondo español de garantía agraria.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). *Guía práctica para la fertilización racional de los cultivos en España*. Madrid.

Murcia Navarro, F. J. (2013). *Lodos de Depuradora: una Visión Integral para su posible Aplicación a Suelos desde una Perspectiva Agrícola*. Murcia: Universidad de Murcia.

Organismo de evaluación y fiscalización ambiental. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima.

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura. (2013). Examen de la Escherichia coli como patógeno emergente transmitido por los alimentos. *Boletín de enfermedades transfronterizas de los animales*, 20-27.

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura. (2013). *El cultivo protegido*. Roma: Grupo de Cultivos Hortícolas.

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. (2002). *Los fertilizantes y sus usos*. Roma.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Organizacion Meteorologica Mundial. (1997). *¿Hay agua suficiente en el mundo?* Bruselas.

Perez León, J. M. (2011). *Manual para determinar la calidad del agua para riego agrícola*. Universidad de Veracruz.

Ramos Ridaio, A. F. (2012). *Ciclo integral del agua. Potabilización, Depuración y Reutilización*. Granada: Universidad de Granada.

Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. (2002). Indicadores de contaminación fecal en aguas. *Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el Desarrollo*. , 223-229.

Rodriguez Chueca, J. J. (2013). *Aplicación de procesos fenton y pseudo-fenton en la regeneración de aguas residuales urbanas*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

Rueda Valdivia, F. J. (2009). *Autodepuración y Vertidos en Cauces de los Rios*. Granada: Universidad de Granada.

Vico Lopez, A. (2015). *Reciclado de lodo de depuradora mediante compostaje: estudio del efecto del agente estructurante usado*. Orihuela: Escuela Politecnica Superior de Orihuela.

