



Universidad
de Alcalá



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Universidad
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

EFECTO DE LA APLICACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA TRATADOS EN EL DESARROLLO DE PLANTAS DE *Ligustrum vulgare* EN UN SUELO CALIZO

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Presentado por:

D^a ELENA NIETO PEÑA

Tutor director:

Dra. M^a CARMEN LOBO BEDMAR

Dra. M^a DEL MAR GIL DÍAZ

Tutor Académico:

Dra. CONCEPCIÓN GONZÁLEZ HUECAS

Madrid, a 28 de OCTUBRE de 2016

Dra. M^a CARMEN LOBO BEDMAR y Dra. M^a DEL MAR GÍL DÍAZ

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado: “Efecto de la aplicación de lodos de depuradora tratados en el desarrollo de plantas de *Ligustrum vulgare* en un suelo calizo”, ha sido realizado bajo mi dirección por la alumna D^a ELENA NIETO PEÑA.

En MADRID, a 28 de OCTUBRE de 2016.

Fdo: Dra. M^a Carmen Lobo Bedmar

Fdo: Dra. M^a del Mar Gil Díaz

Dra. CONCEPCIÓN GONZÁLEZ HUECAS

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: “Efecto de la aplicación de lodos de depuradora tratados en el desarrollo de plantas de *Ligustrum vulgare* en un suelo calizo”, ha sido realizado bajo mi tutorización académica por la alumna D^a ELENA NIETO PEÑA.

En MADRID, a 28 de OCTUBRE de 2016.

Fdo: Dra. Concepción González Huecas

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA INCLUSIÓN DEL TRABAJO
DE FIN DE MASTER EN LOS ARCHIVOS ABIERTOS INSTITUCIONALES DE
LAS UNIVERSIDADES QUE IMPARTEN LA TITULACIÓN

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER: Efecto de la aplicación de lodos de depuradora tratados en el desarrollo de plantas de *Ligustrum vulgare* en un suelo calizo

1.- ESTUDIANTE (AUTOR)

APELLIDOS Y NOMBRE: NIETO PEÑA, ELENA	DNI: 52004267W
TITULACIÓN: Máster Universitario en RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS	

2.- TUTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

APELLIDOS Y NOMBRE: - LOBO BEDMAR, M ^a CARMEN - GIL DÍAZ, M ^a DEL MAR - GONZÁLEZ HUECAS, CONCEPCIÓN	DNI: - 05231809E - 20266582V - 50410265S
DEPARTAMENTO O INSTITUCIÓN: Departamento de Investigación Agroambiental. IMIDRA Departamento de Edafología, Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid	

Los abajo firmantes:

- AUTORIZAN
 NO AUTORIZAN

El depósito y puesta a disposición del Trabajo Fin de Máster en los Repositorios Institucionales de las Universidades que imparten la titulación, de acceso libre y gratuito a través de Internet, y otorgando las condiciones de uso de la licencia Creative Commons reconocimiento-uso no comercial-sin obra derivada.

Más información en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es>

Firmado: El Autor Elena Nieto Peña	Firmado: Tutoras del Trabajo Fin de Máster M ^a Carmen Lobo Bedmar / M ^a del Mar Gil Díaz / Concepción González Huecas
---	--

RESUMEN:

La degradación del suelo es un problema a nivel mundial que afecta a la mayoría de los ecosistemas y supone un impacto negativo sobre la salud humana. Una de las formas de combatirlo es el aprovechamiento de residuos urbanos como fuente de materia orgánica. En este trabajo, se desarrolló un ensayo de campo para evaluar el efecto de la aplicación de dos tipos de lodos de depuradora tratados, lodo compostado con restos de poda (CP) y lodo tratado por secado térmico (ST), sobre el desarrollo de plantas de *Ligustrum vulgare*. El efecto sobre las propiedades del suelo también fue evaluado. Un año después de la plantación se tomaron muestras de suelo y planta. Los resultados obtenidos mostraron una mejora de la fertilidad del suelo para los dos tipos de lodos produciéndose un aumento significativo de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como de la actividad biológica del suelo 15 meses después de la aplicación de la enmienda. La aplicación de lodo CP no produjo efecto significativo en el contenido de metales pesados en el suelo. Respecto al tratamiento con lodo ST, se observó un incremento significativo de la concentración de Zn y Cr en el suelo, debido a la mayor concentración de estos elementos en el lodo. En todos los casos, la concentración obtenida está muy por debajo de los límites legislativos para este tipo de aplicaciones. Respecto a las plantas, se observó una mayor biomasa de la parte aérea en las plantas procedentes de suelo tratado con lodo ST. En las parcelas tratadas con lodo CP se observó un mayor desarrollo radicular de las plantas. En conclusión, la aplicación de lodos como enmienda es una estrategia adecuada para la mejora de la fertilidad de los suelos, suponiendo además una vía de gestión sostenible de estos materiales.

Palabras clave: suelo, lodos, secado térmico, compostaje, aligustre, fertilidad, actividad biológica, metales pesados

ABSTRACT:

Soil degradation is a global problem that affects most of ecosystems and has a negative impact on human health. One way to restore the soil is the use of urban wastes as a source of organic matter. In this paper, a field test was developed to assess the application effect of two types of treated sewage sludge, composted with pruning waste (CP) and treated by thermal drying (ST), on *Ligustrum vulgare* plants development. The effect on soil properties was also evaluated. A year after planting, soil and plant samples were taken. The results showed an improvement in soil fertility with the two types of sludges producing a significant increase in organic matter, nitrogen and phosphorus, as well as in the soil biological activity 15 months after the amendment application. Applying CP sludge produced no significant effect on heavy metals content in soil. Regarding treatment with ST sludge, a significant increase in Zn and Cr concentration was observed, due to the higher concentration of these elements in the sludge. In all cases, obtained soil concentrations are quite below legislative limits for this type of application. Aerial part biomass increased in plants from soil treated with ST sludge whereas that a greater root development was observed where CP sludge was applied. In conclusion, treated sewage sludge application as soil amendment is an appropriate strategy for improving soil fertility, moreover assuming a path of sustainable management of these materials.

Key words: soil, sludge, thermal drying, composting, privet, fertility, biological activity, heavy metals

ÍNDICE

ÍNDICE	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS.....	9
1.2. FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA.....	10
1.3. RESIDUOS COMO FUENTE DE MATERIA ORGÁNICA	10
1.4. APLICACIÓN DE LODOS EN PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS.....	11
1.5. ARBUSTOS PARA RESTAURACIÓN: <i>Ligustrum vulgare</i>	16
2. OBJETIVOS	18
3. MATERIAL Y MÉTODOS	19
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	19
3.2. METODOLOGÍA	22
3.3. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO .	23
3.3.1. pH y conductividad eléctrica.....	23
3.3.2. Materia orgánica oxidable.....	24
3.3.3. Fósforo asimilable.....	24
3.3.4. Cationes asimilables.....	24
3.3.5. Concentración de metales totales en suelo.....	25
3.3.6. Amonio y nitratos.....	25
3.3.7. Nitrógeno total	25
3.3.8. Carbonatos	26
3.3.9. Textura	26
3.3.10. Medida de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM) del suelo.....	27
3.3.11. Actividad biológica.....	27

3.4. ANÁLISIS REALIZADOS EN LA PLANTA	28
3.4.1. Parámetros fisiológicos. Peso seco	28
3.4.2. Concentración de cationes y metales	29
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO .	30
4.2. ANÁLISIS REALIZADOS EN LA PLANTA	34
4.2.1. Parámetros fisiológicos: biomasa.....	34
4.2.2. Concentración de macronutrientes y metales pesados en planta.	35
5. CONCLUSIONES	38
6. AGRADECIMIENTOS	39
7. BIBLIOGRAFÍA	40
8. ANEXO	49
<i>Anexo I. Esquema de la parcela de plantación de las 6 especies de arbustos .</i>	<i>49</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS

La degradación del suelo es un problema a nivel mundial que afecta a la mayoría de los ecosistemas de los que dependen otros medios bióticos (como la vegetación) y abióticos (como el agua) y que afecta negativamente también a la humanidad (Almorox y col., 2010; López, 2002). Esta degradación es debida al crecimiento de la población mundial, al mal uso y manejo de los suelos y de los recursos que se pueden obtener de él (Almorox y col., 2010). La presión antrópica hace que el suelo sea un recurso no renovable en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por lo que es necesario protegerlo para que sea sostenible. Por otra parte, su velocidad de degradación suele ser rápida y la de recuperación, al contrario, lenta (Almorox y col., 2010).

Las múltiples causas que afectan a la degradación del suelo, antrópicas o naturales, alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas, y pueden ser: cambio climático, inundaciones y deslizamientos de tierras, incendios, ocupación del suelo, erosión (hídrica y/o eólica), sellado y encostramiento, contaminación, compactación, disminución de la fertilidad, reducción en el contenido de materia orgánica, descenso de la biodiversidad, salinización y alcalinización de suelos y aguas (Almorox y col., 2010).

Más en concreto, las prácticas agrícolas pueden producir en los suelos procesos de degradación por sobreexplotación, así como por el uso incorrecto de fertilizantes y biocidas (Lobo, 2012). Además, la agricultura intensiva está asociada a la pérdida de cobertura vegetal y de materia orgánica del suelo y supone la incidencia de los procesos de erosión y pérdidas de estructura, de fertilidad y de suelo (Cabrera y col., 2014; Lobo, 2007 y 2012). Entre otros, también se añaden los peligros de compactación causados por la maquinaria agrícola, la sobreexplotación de acuíferos debida al regadío, y la acidificación y la acumulación de metales pesados debidos al uso de fertilizantes y de plaguicidas (Lobo, 2012).

De todo lo anterior, se deduce la necesidad de preservar el suelo de situaciones de estrés y degradación, manteniendo una buena resiliencia y calidad, lo que será más viable y económico que llevar a cabo acciones de restauración (López, 2002).

1.2. FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA

El origen de la materia orgánica de los suelos corresponde a compuestos orgánicos carbonados de diferentes características químicas que se presentan muy interrelacionados con la fracción inorgánica, principalmente arcilla (Sierra y Rojas, 2002). El contenido del carbono orgánico está determinado por la descomposición de los restos vegetales, así como por los organismos, por la cantidad y el tipo de arcilla del suelo, y por las condiciones climáticas (precipitación y temperatura) (Porta y col., 2003).

Existen dos fases en la evolución de la materia orgánica: la humificación (los microorganismos del suelo actúan sobre la materia orgánica fresca y producen humus joven que da paso al humus estable, la mezcla de los dos forma la materia orgánica total del suelo) y la mineralización (proceso donde los restos orgánicos se transforman en sustancias minerales inorgánicas) (Julca y col., 2006; Porta y col., 2003). La materia orgánica se encuentra en los primeros centímetros del suelo, pudiendo llegar a formar un horizonte orgánico, y tiene efecto sobre sus propiedades físicas, formando agregados y dando estabilidad a la estructura debido a su unión con las arcillas y a la generación de complejos de cambio (Julca y col., 2006; Porta y col., 2003). De esta forma, se favorece la permeabilidad y la retención de agua (aumento de la capacidad de campo), mejorando el intercambio gaseoso y disminuyendo la erosión (Julca y col., 2006).

Respecto a las propiedades químicas, al aumentar la capacidad de cambio del suelo, también incrementa el suministro de nutrientes para las plantas, mejorando la capacidad tampón (Julca y col., 2006).

Todas estas mejoras físicas y químicas suponen un beneficio de las propiedades biológicas, favoreciendo los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal y el crecimiento microbiano (Julca y col., 2006; Lobo, 2012).

1.3. RESIDUOS COMO FUENTE DE MATERIA ORGÁNICA

La industrialización del suelo provoca un déficit de materia orgánica y para solucionarlo hay que buscar otras fuentes con un potencial interés tanto económico

como medioambiental. Una opción viable es mediante el aprovechamiento de residuos urbanos, compost de residuos domiciliarios, lodos de depuradora, etc. Esta alternativa de utilización supone una adecuada vía de gestión de este tipo de residuos.

En los procesos de gestión de residuos urbanos, una vez recogida la materia orgánica de forma selectiva (materia orgánica fermentable), su tratamiento puede seguir varias vías aeróbicas o anaeróbicas, desde algunos procesos simples biológicos como el compostaje, hasta procedimientos térmicos complejos como la gasificación o la pirólisis (Flotats y Solé, 2008).

Los organismos y microorganismos del suelo utilizan los residuos de las plantas y los animales y los derivados de la materia orgánica como alimento (FAO, 2003). A medida que descomponen los residuos y la materia orgánica, los nutrientes son liberados de forma disponible para las plantas y sus productos de desecho contribuyen a la formación de la materia orgánica del suelo, que, aunque son más difíciles de descomponer que el material original, pueden ser usados por un gran número de organismos (FAO, 2003).

En la actualidad, diferentes tipos de residuos urbanos o biorresiduos se utilizan como fuente de materia orgánica, como los RSU, lodos de depuradora tratados y lodos procedentes de industrias agroalimentarias (MAGRAMA, 2013).

1.4. APLICACIÓN DE LODOS EN PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS

La aplicación de lodos como enmienda orgánica es una alternativa viable a la eliminación de estos materiales, que incrementaron su volumen debido al cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas que obliga a ubicar instalaciones depuradoras en poblaciones con más de 2000 habitantes. A partir de la Directiva 86/278/CEE, traspuesta en el Real Decreto 1310/1990 y en la Orden AAA/1072/2013 se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, estableciendo las normas para el uso de lodos de depuradora como fertilizante.

La depuración de las aguas residuales supone la aplicación de tratamientos físicos, químicos y biológicos y reduce los contaminantes presentes en las aguas para hacerlas aptas para otros usos, obteniéndose como subproducto los lodos residuales (EPA, 2004). Los procesos de tratamiento de lodos pueden incluir procesos de digestión anaerobia, digestión aerobia, tratamiento químico e incineración, cuya finalidad es reducir el volumen y el poder de fermentación o estabilizar los biosólidos (Flotats y Solé, 2008).

A continuación, se muestra un esquema resumen del tratamiento de aguas residuales en planta y de la producción de lodos (Figura 1). El tratamiento general de los fangos o lodos se divide en: estabilización (eliminación de la posible actividad bioquímica), espesamiento (en los decantadores-espesadores), acondicionamiento y deshidratación (mediante filtros banda, filtros-prensa, centrífugas...).

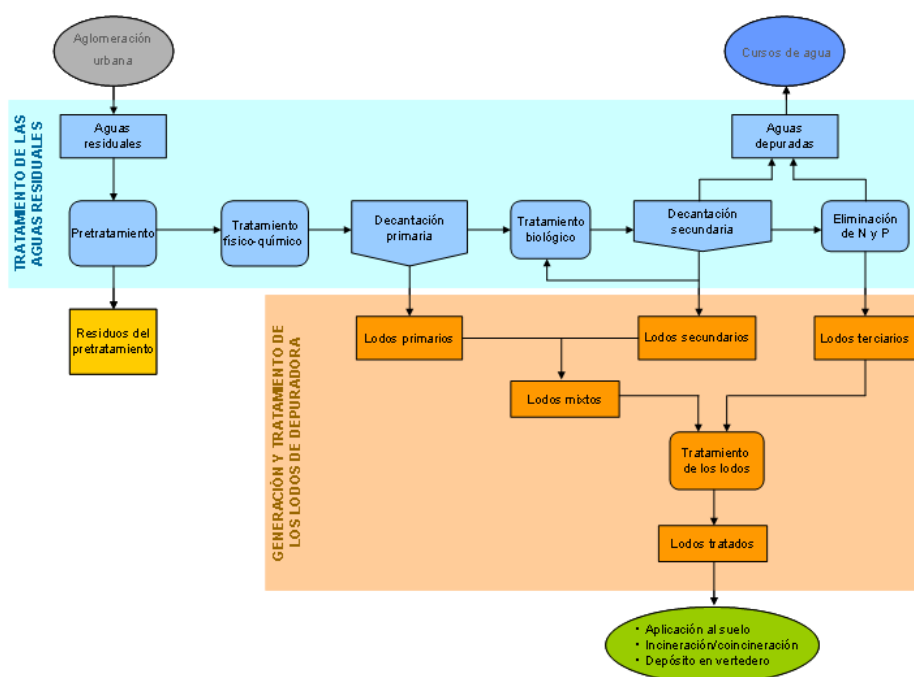


Figura 1. Esquema de la generación y tratamiento de los lodos (fuente: MAGRAMA <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujo/lodos-depuradora/>)

Los lodos incorporan al suelo materia orgánica y nutrientes, que inducen mejoras en su productividad y en la recuperación de ecosistemas degradados (Canal de Isabel II, 1995; EPA, 2004; Lobo y col., 2010). Sin embargo, se debe realizar controladamente, conociendo las variables que pueden intervenir, como confirmar la ausencia de organismos patógenos así como el contenido de metales pesados y teniendo en cuenta

que pueden alterarse las propiedades físicas, químicas, físico-química y bioquímicas del suelo (Canal de Isabel II, 1995; Pérez y col., 2016).

Los lodos para uso agrícola que se utilizaron en este trabajo siguieron los siguientes tratamientos:

- Compostaje: es uno de los tratamientos que se aplica para estabilizar la materia orgánica (mineralizando la materia orgánica), es dinámico, biológico y se realiza bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo, como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico (Elías, 2009; Soliva y col., 2008). Es un procedimiento sencillo y está representado en la *Figura 2*, puede aplicarse a una gran variedad de tipos de materiales y se considera que es económico y ecológico (Soliva y Huerta, 2004). En ocasiones el proceso de compostaje se optimiza mezclando el lodo con restos de poda.

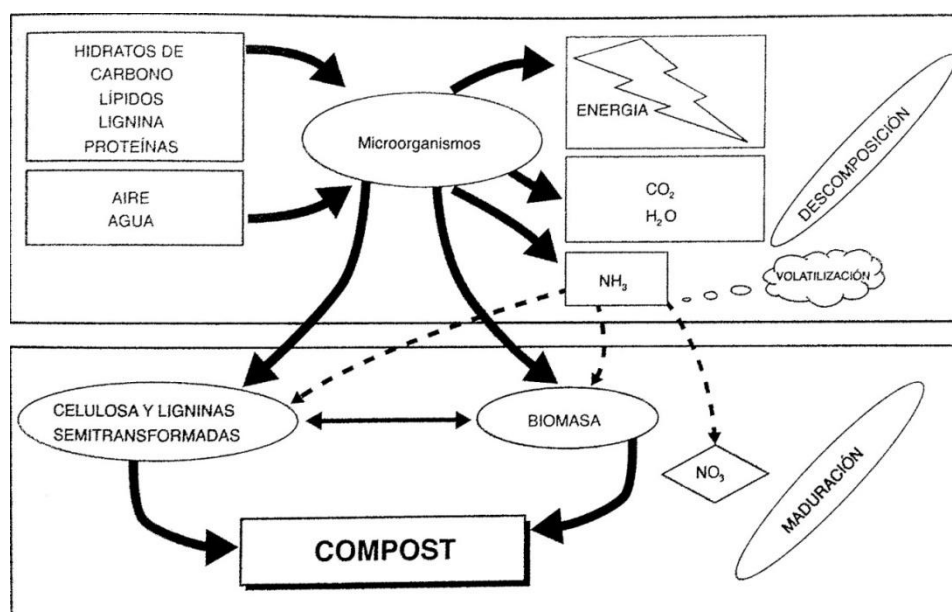
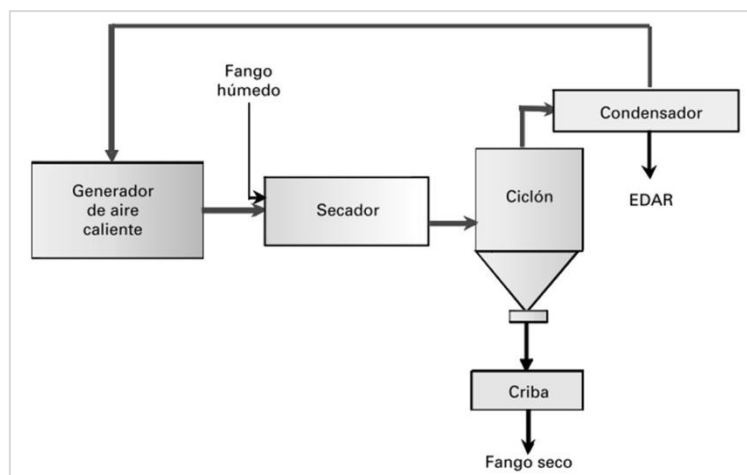


Figura 2. Esquema del proceso de compostaje (fuente: Soliva y col., 2008)

El compost se utiliza en suelos agrícolas, y puede mejorar diferentes características del suelo, como la infiltración y retención de agua, reducir la erosión, y aportar materia orgánica y nutrientes para las plantas (Soliva y col., 2008).

- Secado térmico: es un proceso físico energético de estabilización o de deshidratación donde se somete el lodo a corriente de aire a 200°C con el objeto de eliminar el mayor porcentaje de humedad, originando un producto sólido y de fácil manejo (Aguiló, 2008; Cabrera, 2004; Elías, 2009; Mata-Álvarez y col., 2008) (*Figura*

3). Previamente se somete a un proceso de deshidratación por decantación para facilitar los procesos posteriores (Elías, 2009).



*Figura 3. Fases principales de un secado térmico (secador, ciclón y condensador)
(fuente: Elías, 2009)*

Hay muchos ejemplos de ensayos y estudios sobre los efectos de aplicación de lodos para combatir procesos de erosión (Marqués, 2006), así como para mejorar las características de los suelos (Aguilar y col., 2003; Burgos y col., 2006), donde se observaron importantes incrementos de fósforo disponible y del nitrógeno inorgánico, fundamentalmente en forma nítrica. Además en estos estudios, se observó una ligera acidificación del medio justificada por la mineralización de la materia orgánica y por los procesos de nitrificación del amonio con liberación de hidrogeniones.

En este tipo de ensayos, la materia orgánica del suelo incrementa significativamente y como consecuencia, la actividad biológica (Sastre-Conde y col., 2007). Estos autores observaron el incremento de la biomasa de especies herbáceas en suelos tratados con lodos compostados y de secado térmico, así como de la medida de diferentes actividades enzimáticas que podrían ser utilizadas como indicadores biológicos en programas de recuperación de suelos.

Dada la composición del lodo, la presencia de metales pesados, y contaminantes orgánicos, así como de patógenos, se hace necesario un uso racional de estos materiales a fin de evitar que estos contaminantes pasen a la cadena trófica, lo que implica conocer su naturaleza y las dosis a aplicar también con el fin de contribuir a la mejora de las propiedades del suelo y a la producción de los cultivos (Alcañiz i Baldellou y col., 2009; Lobo y col., 2010; Pérez y col., 2016). En este sentido, para evitar efectos

adversos, diferentes autores, Acosta y col. (1995), Castañeda y col. (2011) y Martín y col. (2002), en ensayos de aplicación de lodos a suelos cultivados con maíz, observaron un incremento del pH que disminuyó la disponibilidad de los metales pesados, así como incrementos de la materia orgánica y mejora de la producción, manteniéndose la concentración de metales pesados en el suelo por debajo de los límites legislativos.

En el estudio de Scotti y col. (2015), en sistemas de agricultura intensiva, se concluye que la aplicación de enmiendas orgánicas, en particular el compost, pueden representar la herramienta sostenible para mejorar la fertilidad del suelo y las existencias de C orgánico, que dependen del balance de carbono en el suelo.

Miralles y col. (2003) evaluaron tres tratamientos, lodo compostado, lodo compostado con restos de poda y lodo deshidratado por secado térmico. En general, las variables estudiadas (el contenido de nitrógeno, amonio, nitrato, materia orgánica, fósforo y potasio) aumentaron con los tres tratamientos y el mejor tratamiento respecto a la disponibilidad de nutrientes fue el lodo deshidratado por secado térmico seguido del lodo compostado con restos de poda y por último el lodo compostado.

En el estudio de Gul y col. (2015) utilizaron distintas enmiendas y evaluaron la toxicidad de los metales pesados, que no depende de su concentración total, sino de su concentración biodisponible. Observaron que se produjo una disminución de la toxicidad de los metales pesados mediante la reducción de sus fracciones disponibles, que a su vez reducen la transferencia de metales pesados a las plantas.

Otros autores (Gascó y col., 2005) han evaluado la lixiviación de los metales en suelos tratados con lodos. Se observó que más del 86% de los metales aplicados fueron retenidos en los primeros 10 cm del suelo y que el comportamiento fue similar para todos los metales. Parte de los metales se desplazaron a través de las columnas de suelo unidos a carbono orgánico disuelto, no superando las concentraciones máximas de metales lixiviados los límites establecidos para el agua de riego. En relación a la legislación de agua potable, las concentraciones de Pb y Ni estaban por encima de los valores de referencia en todos los tratamientos.

En otros estudios se evalúa también el efecto de la aplicación de lodos en la vegetación (García y col., 2000) observando incrementos en la biomasa aplicando dosis de lodos tratados a concentraciones entre 40 y 80 t/ha, obteniéndose al mismo tiempo,

una mejora en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que contribuiría al control de la erosión. En el estudio de López y col. (2008) se utilizaron composts de distintos orígenes como sustrato en proporciones en torno al 50% de mezcla con turba, obteniéndose resultados favorables para el crecimiento de las distintas especies estudiadas. Sastre-Conde y col. (2015) utilizaron lodos compostados con restos de poda y de secado térmico en ensayos de remediación de suelos salinos. En general, el índice de germinación de semillas de la especie que estudiaron (*Raphanus sativus*) mejoró con las enmiendas en comparación con el suelo salino sódico original, y mejoraron algunas propiedades físico-químicas respecto al control.

Algunos autores (Gascó y Lobo, 2007) sugieren que las regulaciones sobre la utilización de los lodos de depuradora en terrenos agrícolas deben tener en cuenta también los valores límite de salinidad que tienen estos materiales y no sólo la concentración de metales. En este sentido, Miralles y col. (2002), atribuyeron a la conductividad eléctrica el efecto de fitotoxicidad en cultivos.

Dada la complejidad y variabilidad de los suelos y de estos materiales, sería necesario la realización de ensayos a medio y largo plazo, a fin de evaluar con mayor profundidad las ventajas y desventajas de la aplicación de lodos residuales sobre el suelo. En general, la aplicación de los lodos de depuradora debe llevarse a cabo conociendo las características del material, el tipo de suelo y el cultivo al que va destinado.

1.5. ARBUSTOS PARA RESTAURACIÓN: *Ligustrum vulgare*

La revegetación es una estrategia muy común que se lleva a cabo en los proyectos de restauración para el control y prevención de la erosión puesto que las plantas disminuyen este factor favoreciendo con el sistema radicular la estabilidad de los agregados del suelo y como consecuencia su capacidad de retención de agua y la actividad biológica. El aligustre (*Ligustrum vulgare*) se puede encontrar de forma autóctona en la mitad norte de la Península Ibérica (*Figura 4*), se encuentra en diferentes ecosistemas y soporta un rango amplio de condiciones ambientales de humedad (mediana o alta), insolación (en sol o media sombra) y edáficos (prefiere

suelos profundos, principalmente calizos, relativamente fértiles y sin tendencia limitante en cuanto al pH) (Flora vascular y Vivers Carex).



Figura 4. Registros (fuente: <http://www.anthos.es/>) y distribución de *Ligustrum vulgare* (fuente: *Ligustrum vulgare* - Flora vascular)

Es una especie que se suele utilizar en restauraciones ambientales (Arenillas, 2012; Basoainsa, 2012; Del Río y col., 2012) y también en jardinería para formar setos, como arbusto ornamental (Flora vascular y Vivers Carex).

Hay pocas referencias sobre la utilización de esta especie en suelos tratados con lodos. Algunos autores han observado su capacidad para retener metales pesados en sus hojas y tallos (Demirayak y col., 2011), siendo el Zn el metal que más retiene junto con Cu, Cd y Pb. Ataabadi y col. (2011) observaron una mayor acumulación de metales en *Ligustrum vulgare* que en *Quercus brantii* en un área con contaminación de Al, Fe y Ni.

Otros trabajos con plantas del mismo género (Rossini y Valdés, 2004), determinaron concentraciones de 11 elementos en hojas de *Ligustrum lucidum* Ait. f. y los resultados demostraron que esta especie es útil como bioindicador en clima mediterráneo. Wang y col. (2003) compararon las concentraciones de metales pesados en numerosas especies de plantas en sitios contaminados, observando que *Ligustrum lucidum* poseía un mecanismo específico a elevadas concentración de metales pesados (Mn: 84,94; Cr: 131,88; Cu: 114,78; Zn: 780,53; Cd: 1,34; Pb: 91,83 mg/kg) por lo que podría ser interesante en estudios de fitorremediación. En otra investigación (Zhou y col., 2009) mostraron el efecto beneficioso en el crecimiento de plantas de *Ligustrum quihoui* Carr en suelos contaminados mediante la inoculación de microorganismos. El sistema microorganismo-planta mejoró el efecto de recuperación de la planta respecto a los metales pesados.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es evaluar el efecto de la aplicación de dos tipos de lodos de depuradora tratados (lodo compostado con restos de poda y lodo tratado por secado térmico) sobre el desarrollo de plantas de *Ligustrum vulgare* en un ensayo en campo sobre un suelo calizo.

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de los lodos tratados sobre las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo.
- Estudiar la respuesta de las plantas a la aplicación de los lodos.
- Determinar la potencial transferencia de metales a la planta.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se ha realizado en el Departamento de Investigación Agroambiental del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), situado en la Finca “El Encín”, en Alcalá de Henares.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El ensayo se ha realizado en un emplazamiento en el que durante 20 años se llevó a cabo una actividad de invernaderos de plantas ornamentales. Al final del desmantelamiento de los edificios (*Figura 5*), el emplazamiento fue analizado en marzo de 2013, caracterizándose el suelo por bajos niveles de materia orgánica y nutrientes y un elevado grado de compactación del suelo (*Tabla 1*).



Figura 5. Invernadero de rosas en el 2009 (fuente: Nomecalles, ICM) y desmantelamiento de la instalación

Previamente a la preparación de las parcelas de ensayo se llevó a cabo un movimiento del suelo con maquinaria agrícola, a fin de homogeneizar los primeros 60 cm del perfil y airear el suelo (enero 2015). Esta operación favorece las propiedades físico-químicas del suelo, mejorando la estructura, así como estimulando las poblaciones microbianas, e incorporando raíces, lo que supone un incremento de la materia orgánica (*Tabla 1*).

Tabla 1. Características físico-químicas del suelo previas a los tratamientos.

Zona	marzo 2013		enero 2015	
	A	B	A	B
pH	8,03	8,2	8,11	8,15
CE (dS/m)	0,49	0,73	0,33	0,37
CO₃²⁻ (%)	0,5	3,4	0,5	3,2
N (%)	0,10	0,09	0,11	0,11
MO (%)	1,65	1,36	1,88	2,26
P (mg/kg)	40,5	11,5	46,2	15,2
K (mg/kg)	251	213	483	493
Na (mg/kg)	132	195	38	57
Ca (mg/kg)	2760	3206	3331	3197
Mg (mg/kg)	1428	1539	787	744
Cu (mg/kg)		25		19
Ni (mg/kg)		15		11
Pb (mg/kg)		22		30
Zn (mg/kg)		112		99
Cr (mg/kg)		48		36
Cd (mg/kg)		< LD		< LD

<LD: menor que el límite de detección.

Tras esta operación se seleccionaron las parcelas para el ensayo en dos zonas del emplazamiento, A y B (*Figura 6*). En la zona A se seleccionaron dos parcelas de 20x20 m, en una de ellas se aplicó como enmienda lodo tratado por secado térmico (ST) a la dosis de 50t/ha, utilizándose la segunda parcela como control. En ambas parcelas se plantaron 6 especies de arbustos en subparcelas de 2,4x7m llevando a cabo la plantación en bloques al azar (*Anexo I*).

En la zona B (*Figura 6*) se seleccionaron dos parcelas igual que en la zona A (20 x 20 m), pero la enmienda utilizada en este caso fue lodo de depuradora compostado con restos de poda (CP) a la dosis de 50 t/ha. Del mismo modo se seleccionó una parcela control y se llevó a cabo la plantación de las 6 especies de arbustos.

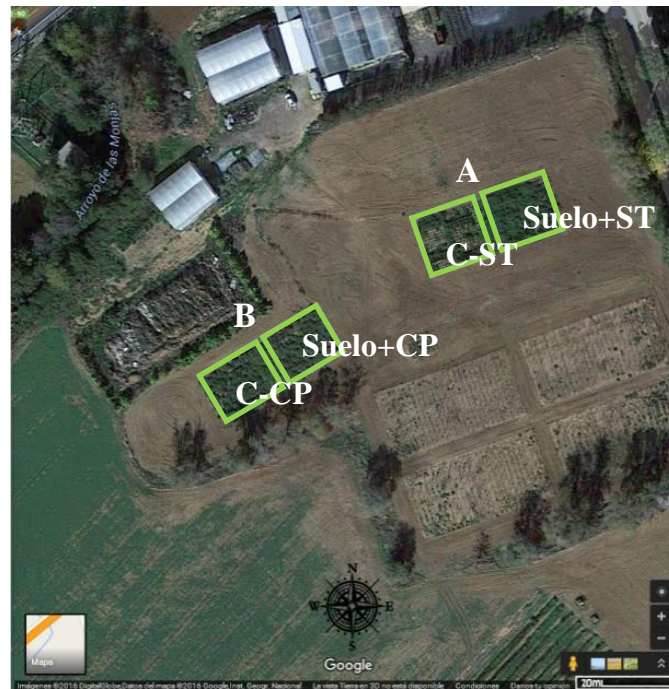


Figura 6. Vista aérea de las parcelas con los tratamientos en 2016 (fuente: Google Maps)

La aplicación de los lodos tratados se llevó a cabo en marzo de 2015. Una vez aplicados se incorporaron al horizonte superficial mediante maquinaria agrícola. Para el ensayo objeto de este trabajo se seleccionó el *Ligustrum vulgare*, que fue plantado transcurridos tres meses, en junio de 2015, en las subparcelas en 3 líneas de 15 plantones cada una, lo que supone un total de 360 plantas en cada parcela.

En la *Tabla 2* se encuentran las características de los dos tipos de lodos aplicados junto con las concentraciones límite de metales pesados según la legislación. Ambos lodos tratados presentaron una concentración de metales pesados inferior a la máxima permitida para su aplicación en suelos agrícolas.

Tabla 2. Características físico-químicas de los lodos aplicados al suelo y concentración límite de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (Fuente: Real Decreto 1310/1990).

	Lodos	ST	CP		
	pH	6,05	6,76		
	CE (dS/m)	9,6	4,41		
	N (%)	4,12	1,64		
	MO (%)	22,78	31,93		
	P (mg/kg)	1116	938		
	K (mg/kg)	1534	4178		
Cationes asimilables	Na (mg/kg)	701	688		
	Ca (mg/kg)	4335	9380		
	Mg (mg/kg)	1256	872	pH suelo <7	pH suelo >7
Metales	Cu (mg/kg)	575	208	1000	1750
	Ni (mg/kg)	189	26	300	400
	Pb (mg/kg)	80	30	750	1200
	Zn (mg/kg)	4168	303	2500	4000
	Cr (mg/kg)	896	23	1000	1500
	Cd (mg/kg)	< LD	< LD	20	40

<LD: menor que el límite de detección.

3.2. METODOLOGÍA

Los muestreos de suelo y material vegetal se han llevado a cabo un año después de la plantación. Las muestras de suelo se tomaron de los primeros 30 cm del perfil y se secaron al aire previamente a la realización de las determinaciones analíticas.

El material vegetal se muestreo tomando dos plantas por parcela, debido a su elevado porte y la dificultad de muestreo por la elevada densidad de vegetación herbácea. Las plantas se pesaron, secaron al aire y se separó la parte aérea de la raíz (Figura 7).



Figura 7. Muestreo de plantas de aligustre en las parcelas de ensayo y separación de la raíz y parte aérea de las plantas de Ligustrum vulgare

3.3. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO

Las muestras de suelo se tamizaron a 2 mm y parte se molió previamente a su caracterización físico-química según los métodos oficiales de análisis (MAPA, 1994) y a su análisis biológico. Los análisis realizados se detallan a continuación.

3.3.1. pH y conductividad eléctrica

Se pesaron 10 g de suelo tamizado de cada muestra, se añadieron 25mL de agua destilada (1:2,5 p/v) y se dejó en reposo durante 25 minutos agitando cada 5 minutos. Con un pH-metro *Crison-MultiMeter MM 41* se midió el pH y la conductividad con electrodos específicos para cada determinación.

3.3.2. Materia orgánica oxidable

Se utilizó el método Walkley-Black modificado, se pesó 0,2 g de suelo molido y para determinar el carbono orgánico se oxidó con 10 mL de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de 20 mL de ácido sulfúrico concentrado 95-98% (H_2SO_4) y se dejó enfriar. El exceso de oxidante se valoró con un potenciómetro automático *Metrohm728 Stirrer* utilizando sulfato ferroso amónico 0,5 N (sal de Mohr, $[(SO_4)_2Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O]$). La cantidad de carbono orgánico oxidado se calculó a partir de la cantidad de $K_2Cr_2O_7$ reducido, y se obtuvo el valor de materia orgánica oxidable en el suelo multiplicando el carbono orgánico obtenido por el factor de Van Bemmelen (1,724).

3.3.3. Fósforo asimilable

Para cuantificar el fósforo asimilable se utilizó el método Olsen modificado. Se agitó durante 30 minutos la mezcla de 5 g de suelo molido y 100 mL de la solución extractora ($NaHCO_3$, 0,5 M) y se agitó manualmente inmediatamente antes de filtrarlo. Se tomó 10 mL del filtrado, se mezcló en un matraz de 50 mL con 1,5 mL de H_2SO_4 1,5 M, se añadieron 10 mL de agua destilada y se agitó manualmente. Se añadieron 8 mL de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), se enrasó y se midió la absorbancia del compuesto coloreado formado a 660 nm utilizando un espectrofotómetro UV/Visible *ThermoSpectronicHELIOS α* . La concentración de fósforo de la muestra se calculó por interpolación en una curva de calibrado.

3.3.4. Cationes asimilables

Los cationes intercambiables (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) del suelo se extrajeron partiendo de 10 g de suelo mediante 3 extracciones sucesivas con 25 mL de acetato amónico ($C_2H_3O_2NH_4$) 1 N a pH 7. Esta mezcla se agitó durante 10 minutos con un agitador rotativo (*J.P. Selecta-Rotaterm*) y se centrifugó durante otros 10 minutos en una centrífuga (*Sigma 3-16*) a 3500 rpm. El sobrenadante obtenido se filtró (*Filter-Lab 1300/80*) y, después de las 2 repeticiones, se enrasó a 100 mL. Posteriormente se

analizaron los elementos en el espectrofotómetro de absorción atómica de llama (*VarianAA240FS*).

3.3.5. Concentración de metales totales en suelo

Para la cuantificación de los metales Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, las muestras de suelo se digirieron en un microondas (*AntonPaarGmbH–MicrowaveDigestionSystem: Multiwave GO*). Se pesaron 0,5 g de suelo molido (en molino de bolas *Retsch MM200*) y se mezclaron con 6 mL de HNO₃ al 65% y 2 mL de HCl al 37%. Tras la digestión, la mezcla se filtró (*Whatman® Hardened, Ashless, Grade 541 FiltrationPaper, Diametro 150 mm*) y enrasó a 50 mL con agua Milli-Q. El Cd del suelo se cuantificó en un espectrómetro de absorción atómica Zeeman con cámara de grafito (*VarianAA240Z*), y el resto de los elementos en el espectrómetro de absorción atómica de llama (*VarianAA240FS*).

3.3.6. Amonio y nitratos

La concentración de nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) se analizó por el método Bremner (1965), mediante una destilación por arrastre de vapor; a la muestra se le añadió 20 mL de cloruro de calcio (CaCl₂) 0,001 M y 0,2 mg de óxido de magnesio (MgO) para poner la disolución en medio alcalino y el destilado se recogió sobre 10 mL de ácido bórico (H₃BO₃) con mezcla de indicadores (rojo de metilo y verde de bromocresol) y, finalmente, se valoró con H₂SO₄.

Para la determinación del nitrógeno nítrico (NO₃⁻) se realizó de nuevo la destilación en el medio alcalino añadiendo previamente 0,2 g de aleación Devarda (50% Cu, 45% Al y 5% Zn) y posterior valoración.

3.3.7. Nitrógeno total

Se determinó el contenido de nitrógeno orgánico total mediante el método Khjedahl, que se basa en la mineralización del nitrógeno orgánico (FOSS Tecator Scrubber) y la posterior valoración del amonio (NH₄⁺) producido mediante la adición de

un álcali. El amonio mineralizado se destiló en arrastre de vapor sobre H_3BO_3 y se valoró con una solución ácida estándar utilizando un analizador *FOSS Tecator™-2300-KjeltecAnalyzerUnit*.

3.3.8. Carbonatos

El análisis de carbonatos se determinó utilizando el calcímetro de Bernard, que se basa en la reacción del carbonato presente en el suelo con ácido clorhídrico (HCl) 6 N. Se pesan 0,5 g de suelo y se depositan en un matraz con vástago lateral, en el que se introducen 2-3 mL de HCl, se cierra y se conecta al calcímetro. Al verter el HCl sobre la muestra y agitar suavemente, se desprende CO_2 de la muestra, el nivel de líquido del calcímetro varía y cuando se estabiliza se toma la medida final del volumen. Como control se utilizan blancos de 0,2 g de carbonato cálcico pulverizado ($CaCO_3$).

El porcentaje de carbonatos se determina según la fórmula:

$$\%CO_3^{2-} = 100 \cdot \frac{L}{L'} \cdot \frac{P'}{P}$$

Siendo: L = lectura observada en el calcímetro para la muestra.

L' = lectura observada en el calcímetro para el $CaCO_3$.

P = peso seco de la muestra de suelo (g).

P' = peso seco de $CaCO_3$, 0,2 g según el método descrito.

3.3.9. Textura

La textura del suelo se determinó utilizando el densímetro de Bouyoucos (*PROTON – Areómetro Bouyoucos*), que se basa en la Ley de Stokes, la cual relaciona la concentración de partículas con la densidad de una suspensión de suelo. Con los datos obtenidos de los porcentajes de arcillas, limo y arena, se puede determinar la clase de textura con el diagrama triangular o triángulo textural (USDA, 1993).

Se preparó una disolución sobresaturada de metafosfato de sodio ($NaPO_3$, *Calgón™*) en la proporción 50 g/L con agua de grifo a 20 °C y se mezcló en la placa de agitación durante 30 minutos. Se preparó un blanco con 100 mL de la disolución y el resto, agua de grifo a 20 °C en una probeta de un litro. Se mezclaron 40 g de suelo y 100 mL de la disolución y se dejó reposar durante 10 minutos. Se trasvasó a un vaso y se

removió con un agitador de varilla *Proeti SA* durante 3 minutos, se transfirió a una probeta de un litro, se agitó manualmente y se dejó estabilizar. A continuación se introduce el densímetro en la suspensión y tras 40 segundos de estabilización se anota la primera lectura. De acuerdo a la metodología USDA, a partir de la primera lectura de densidad, se calculan las arenas ($>0,05$ mm), de la medida a las 2 horas, las arcillas ($<0,002$ mm), y la diferencia de ambos son los limos ($0,002 - 0,05$ mm).

3.3.10. Medida de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM) del suelo

Para determinar la capacidad de campo (agua que permanece retenida en el suelo después de una lluvia y pasadas 24 horas o el contenido de humedad a $1/3$ atm), y el punto de marchitamiento (tensión máxima que puede realizar una planta para extraer el agua del suelo a partir del cual, en esas condiciones de humedad, no puede acceder a ese contenido en agua, a una tensión de 15 atm) se utilizaron las cámaras de presión de Richards y placas de cerámica. La diferencia entre ambas se considera como agua disponible o útil para las plantas.

3.3.11. Actividad biológica.

La respiración del suelo refleja la actividad biológica y se basa en la estimación del CO_2 desprendido durante la incubación del suelo en un sistema cerrado. Tiene un sentido ecológico y es importante para conocer la calidad y el estado biológico del suelo. Se humedecen 30 g de suelo con agua destilada, se homogenizan y, se dejan incubar 2 días a la capacidad de campo. A cada muestra se le añaden 0,15 g de una mezcla de glucosa/talco (1:10). De la mezcla se pesan 5 g para la determinación de la respiración, que se hace por triplicado. Las muestras de suelo se introducen en pequeños tubos y se cierran, posteriormente se introducen en los tubos del incubador (*SY-LABBacTrac*) que contienen 2 mL de una disolución de potasa (KOH) al 0,2% y se colocan en el incubador. A continuación se cierra la tapa de los tubos, lo que supone que se abra la tapa de los tubos pequeños interiores comenzando el desprendimiento de CO_2 de las muestras. Como control se introducen 2 tubos con KOH abiertos y otros 2 cerrados.

El CO₂ es absorbido en la disolución de potasa y produce cambios en la impedancia (medida de oposición de un circuito eléctrico al paso de la corriente alterna) de la solución alcalina, que es transformada en una medida indirecta de la actividad metabólica. La medida de la actividad biológica se da en mgCO₂ desprendidos/peso de muestra y tiempo (h).

3.4. ANÁLISIS REALIZADOS EN LA PLANTA

3.4.1. Parámetros fisiológicos. Peso seco

Las plantas se pesaron una vez muestreadas y se obtuvo el peso húmedo. Posteriormente se secaron en las condiciones ambientales hasta peso constante, para determinar el peso seco de la parte aérea, que posteriormente se troceó y molió para llevar a cabo las determinaciones analíticas.

Las raíces se lavaron primero con agua del grifo y en ultrasonidos para eliminar cualquier resto de suelo o enmienda (*Figura 8*) y posteriormente con agua destilada. A continuación se secaron y se determinó el peso seco. Para moler el material vegetal se utilizó un molino de aspas metálicas *IKA–Labortechnik A10*.



Figura 8. Limpieza de las raíces con ultrasonido y fragmentos de material orgánico

3.4.2. Concentración de cationes y metales

Las muestras vegetales se mineralizaron según el protocolo descrito en MAPA (1994) de la siguiente forma. Las muestras vegetales se incineraron en un horno de mufla (*J.P. Selecta–Select-Horn*) a 580°C durante 24 h en cápsulas de porcelana. Las cenizas resultantes se pesaron, se traspasaron a un vaso de precipitados y las cápsulas de porcelana se limpiaron con 1 mL de HCl al 37% y 3 veces con 5 mL de agua Milli-Q, vertiéndolo posteriormente al vaso de precipitados donde se encontraban las cenizas. Se calentaron hasta la ebullición, manteniéndose así durante 30 minutos, se dejaron enfriar y se filtraron a un matraz de 50 mL, limpiando los vasos de precipitado con agua Milli-Q para traspasar el máximo posible del total de las cenizas. Se prepara al mismo tiempo un blanco (sin materia vegetal) al que se le realiza también todo el procedimiento.

En la disolución obtenida se determinaron los nutrientes y metales (Ca, Na, Mg, K, Cr, Cu, y Zn) por Espectrofotometría de Absorción Atómica (*Varian AA240F*) y el Cd, Ni y Pb por Espectrofotometría de Absorción Atómica Zeeman con cámara de grafito (*VarianAA240Z*).

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para analizar los datos obtenidos estadísticamente se utilizó el programa SPSS versión 19.0.0.1 (SPSS Inc., IBM Company), aplicando el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significación $p < 0,05$ para comparar los tratamientos. Se aplicó el test de Duncan para determinar qué medias presentaban diferencias significativas cuando las varianzas eran homogéneas y cuando no lo eran, se utilizó el método de Games-Howell.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO

Para evaluar la influencia de la aplicación de los dos tipos de lodos tratados al suelo se analizaron diferentes propiedades físico-químicas y biológicas de las muestras de suelo recogidas 15 meses después de la aplicación de dichos lodos. La *Tabla 3* muestra los valores medios de los parámetros físico-químicos analizados en las muestras de suelo tratadas y en sus respectivos controles. Las características físico-químicas de las zonas A y B son similares, aunque cabe destacar que la zona A presenta un menor contenido de carbonatos y mayor de materia orgánica y fósforo que la zona B.

Tabla.3. Valores medios de parámetros físico-químicos medidos en suelos control y suelos tratados con lodos (ST y CP).

Zona	Muestra	pH	C.E (dS/m)	CO ₃ ²⁻ (%)	N %	NH ₄ ⁺ (mg/kg)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)	M.O (%)	P (mg/kg)
A	C-ST	8,23a	0,380b	0,81c	0,16b	5,94b	2,60b	3,32b	55,08a
	Suelo+ST	7,73c	0,414a	0,76c	0,24a	9,29a	7,99a	4,39a	60,76a
B	C-CP	8,28a	0,379b	1,70b	0,14c	5,13b	2,34b	2,58c	21,88c
	Suelo+CP	7,97b	0,465a	2,44a	0,20ab	8,60a	4,05ab	5,08a	29,99b

Valores medios seguidos por la misma letra indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

C.E.: conductividad eléctrica; M.O: materia orgánica.

Los suelos tratados con lodos (Suelo+ST y Suelo+CP) experimentaron una disminución significativa del pH ($p < 0,05$) respecto a las zonas control (C-ST y C-CP). Comparando entre los dos tipos de lodos, la aplicación del lodo ST indujo una mayor reducción del pH que el lodo CP en Suelo+CP, probablemente debido a las características de este material (*Tabla 2*). Este comportamiento coincide con el obtenido por Sastre-Conde y col. (2007) en un ensayo en invernadero con suelos tratados con estos dos tipos de lodos. Gascó y col. (2007) observaron también un descenso del pH de suelos enmendados con lodos tratados por secado térmico.

La conductividad eléctrica del suelo presentó un ligero incremento después de la aplicación de las enmiendas orgánicas, manteniéndose los valores dentro de los intervalos de normalidad para el desarrollo de las plantas. Este aumento se debe al incremento de sales procedentes de los lodos. Otros autores han observado este efecto

en suelos tratados con lodos (Bonanomi y col., 2014; Gascó y col., 2005 y 2007; Sastre-Conde y col., 2007 y 2015).

La aplicación de lodos produjo un efecto diferente en los carbonatos en función del tipo de lodo aplicado, el tratamiento ST no afectó significativamente al contenido en CO_3^{2-} , mientras que el tratamiento CP produjo un incremento significativo del mismo. Esto puede ser debido al mayor contenido en Ca que presenta el lodo CP (*Tabla 2*).

En el caso del nitrógeno total, los suelos tratados presentaron una concentración significativamente mayor respecto a sus controles, debido al aporte de los lodos como se observa en otros ensayos realizados con estos lodos tratados (Sastre-Conde y col., 2007). El análisis de las fracciones de nitrógeno muestra que tanto el amonio (NH_4^+) como los nitratos aumentan en los suelos tratados de forma significativa especialmente en los suelos tratados con ST, donde la liberación de nitrógeno es más rápida. El lodo compostado (CP) se va degradando lentamente a lo largo del tiempo, por lo que la liberación de nutrientes es progresiva (Miralles y col., 2003).

La aplicación de los lodos indujo un incremento significativo de la materia orgánica del suelo, un 32% en el caso del tratamiento ST y un 97% para el CP. Esto hecho es debido al mayor aporte inicial por parte del lodo CP (*Tabla 2*), así como a la mayor disponibilidad de la materia orgánica a partir del compost. Sastre-Conde y col. (2007) también observaron un mayor incremento de la materia orgánica en suelos tratados con lodo compostado.

La concentración de fósforo asimilable resultó mayor en los suelos tratados con lodos, aunque sólo fue significativo en el caso del tratamiento CP. Otros trabajos han obtenidos resultados similares al aplicar lodos tratados (Miralles y col., 2003 y Sastre-Conde y col., 2007).

En cuanto al contenido de cationes asimilables en el suelo (*Tabla 4*), la aplicación de lodos en las condiciones del ensayo no produjo un efecto destacado. Cabe resaltar que en el suelo tratado con lodo CP el potasio disminuyó significativamente, mientras que el sodio y el calcio aumentaron. En el tratamiento ST no se encontraron diferencias significativas entre suelo tratado y no tratado.

Tabla 4. Concentración media de macronutrientes en el suelo.

Zona	Muestra	Macronutrientes asimilables (mg/kg)			
		K	Na	Ca	Mg
A	C-ST	416b	184a	2787b	832a
	Suelo+ST	480ab	166ab	2664b	826a
B	C-CP	507a	120c	2924b	820a
	Suelo+CP	435b	155b	3303a	856a

Valores medios seguidos por la misma letra indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

En general se observa que la aplicación de lodos al suelo incrementó su fertilidad, incluso 15 meses después del tratamiento, como muestran los datos de nitrógeno, materia orgánica y fósforo.

La concentración media de los metales pesados en las muestras de suelo se muestra en la Tabla 5. En general, la zona A mostró un mayor contenido en Cu y Zn que la zona B. La aplicación de lodo CP al suelo no produjo efecto significativo en el contenido de metales pesados en el suelo. Respecto al tratamiento con lodo ST, se observó un incremento significativo de la concentración de Zn y Cr en el suelo, debido a la mayor concentración de estos elementos en el lodo ST (4168 y 896 mg/kg respectivamente) en comparación con el lodo CP (303 y 23 mg/kg) (Tabla 2). En todos los casos, la concentración obtenida está muy por debajo de los límites legislativos para la aplicación de este tipo de materiales a suelos agrícolas (RD 1310/1990 y Orden AAA1072/2013) y de los niveles genéricos de referencia para suelos de la Comunidad de Madrid (Orden 2770/2006, de 11 de agosto). Los resultados obtenidos indican que la dosis seleccionada no representaría ningún riesgo en relación a la incorporación de metales pesados al suelo.

Tabla 5. Concentración media de metales en el suelo de ensayo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Comunidad de Madrid (fuente: RD 1310/1990 y Orden 2770/2006).

Zona	Muestra	Metales totales (mg/kg)					
		Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	Cd
A	C-ST	21,7a	17,8ab	19,3ab	92,5b	35,7b	0,45a
	Suelo+ST	33,2a	20,8a	22,0a	240a	53,2a	0,40a
B	C-CP	16,8b	14,9b	16,6bc	70,2c	29,0b	0,42a
	Suelo+CP	18,7b	17,9ab	14,2c	64,6c	28,9b	0,41a
RD 1310/1990	Suelos pH>7	210	112	300	450	150	3
Niveles genéricos de referencia dependiendo de los usos del suelo	Industrial	8000	15600	2700	100000	2300	300
	Urbano	800	1560	270	11700	230	30
	Otros usos del	80	405	75	1170	90	3
	VR90	20	21	30	73	32	0,22

Valores medios seguidos por la misma letra indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La *Tabla 6* muestra las características físicas del suelo relativas a la capacidad de campo, punto de marchitamiento y textura, según el porcentaje de arena, limo y arcilla. En general la aplicación de los lodos tratados al suelo en las condiciones experimentales no afectó a estas propiedades físicas del suelo. Se observó un ligero incremento en la capacidad de campo y punto de marchitamiento. El efecto de la aplicación de lodos sobre las propiedades físicas ha sido observado por diversos autores (Aguilar y col., 2003; Celik y col., 2004; Hernando y col., 1989; Lobo y col., 2012; Scotti y col., 2015). Como se muestra en la *Figura 9*, los suelos analizados presentaron una textura muy similar.

Tabla 6. Valores medios de capacidad de campo, punto de marchitamiento y textura.

Zona	Muestra	CC (%)	PM (%)	ARENA (%) >0,05 mm	LIMO (%) 0,002–0,05mm	ARCILLA (%) <0,002 mm
A	C-ST	16,98	14,47	33,38	23,13	43,50
	Suelo+ST	17,82	14,99	34,00	22,50	43,50
B	C-CP	16,22	14,08	35,08	24,38	40,55
	Suelo+CP	17,48	15,43	40,08	21,88	38,05

CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitamiento.

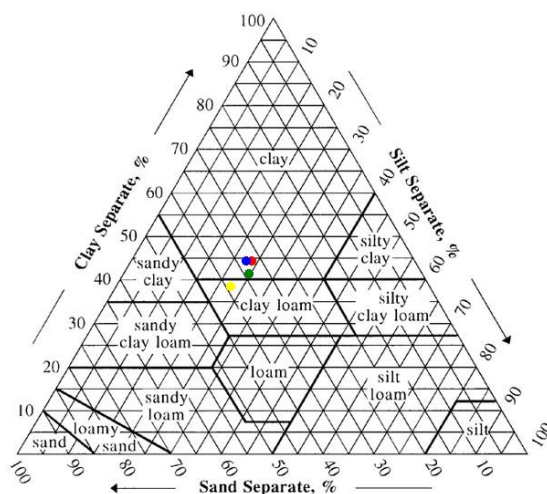


Figura 9. Textura de las muestras de suelo en el diagrama triangular de USDA. Rojo:

C-ST; Azul: Suelo+ST; Verde: C-CP; Amarillo: Suelo+CP. (Fuente:

http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167)

En este estudio la actividad biológica del suelo se ha evaluado mediante la medida de la respiración del suelo (*Figura 10*). Los suelos tratados con lodos mostraron un incremento significativo de la tasa de respiración del suelo, lo que indica un aumento de la actividad de la biota del suelo. Este efecto está relacionado con el porcentaje de

materia orgánica que los lodos han aportado al suelo (*Tabla 3*). Otros autores han observado incremento de la actividad biológica, utilizando actividades enzimáticas como indicadores biológicos (Sastre-Conde y col, 2007; García y Lobo, 2008; Scotti y col. 2015).

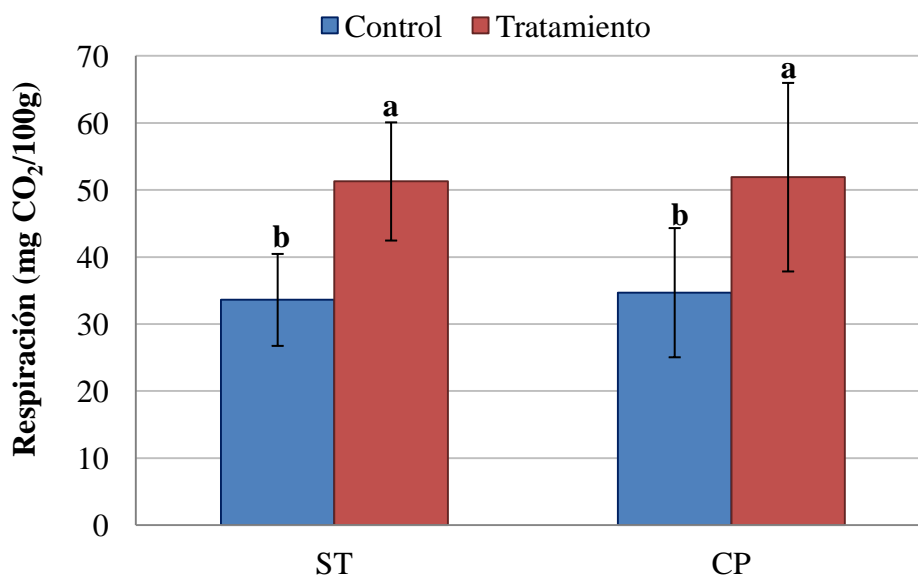


Figura 10. Actividad biológica en los suelos

Valores medios seguidos por la misma letra indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

4.2. ANÁLISIS REALIZADOS EN LA PLANTA

4.2.1. Parámetros fisiológicos: biomasa.

En la *Figura 11* se representan los datos de biomasa de raíz y parte aérea de las plantas. En los suelos tratados con ST se observó un incremento de biomasa de la parte aérea en relación al control. Este efecto no se observa en las parcelas tratadas con CP. Este hecho puede ser debido, por una parte, a la gran variabilidad de las plantas en el ensayo en campo y, por otra parte, al mayor contenido en agua de las plantas de la parcela tratada con CP respecto al control como se muestra en la *Figura 12*. En relación a la raíz, se observa un incremento en las plantas procedentes de suelos tratados con el lodo CP en relación al control, no observándose este efecto en el tratamiento ST. Un mayor desarrollo del sistema radicular también fue observado en el estudio realizado

por Sastre-Conde y col. (2007) en un ensayo de invernadero. En el mismo sentido, ensayos realizados con *Raphanus sativus* mostraron una mayor longitud radicular en suelos salinos tratados con lodo CP en comparación a los tratados con ST (Sastre-Conde y col., 2015).

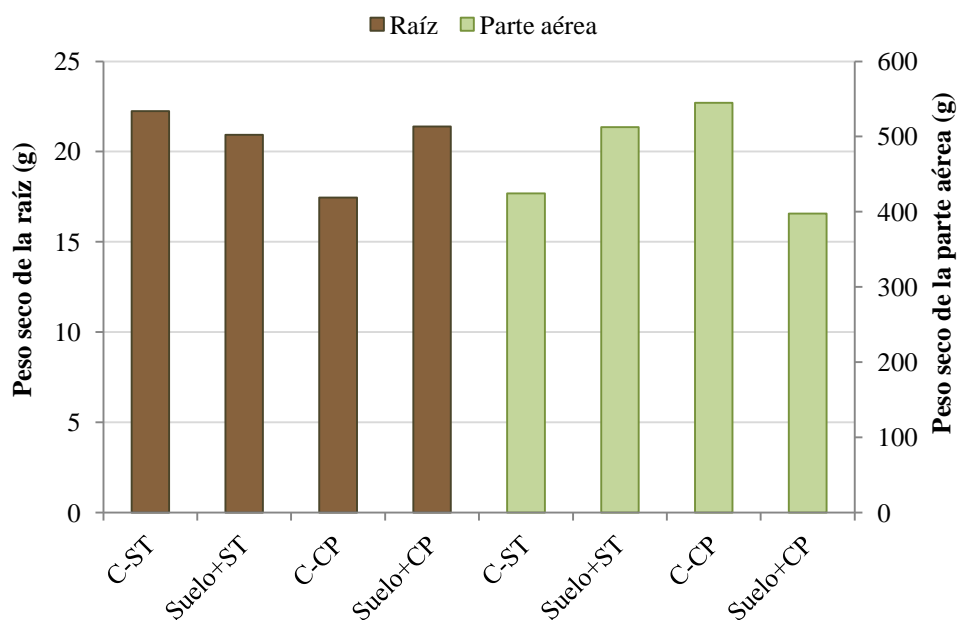


Figura 11. Biomasa de las plantas de *Ligustrum vulgare*

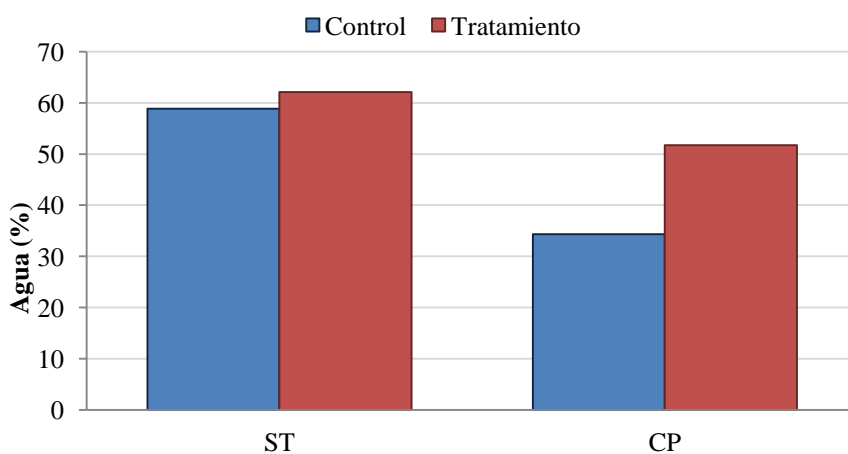


Figura 12. Porcentaje de humedad en plantas de *Ligustrum vulgare*

4.2.2. Concentración de macronutrientes y metales pesados en planta.

La Tabla 7 muestra la concentración media de los macronutrientes K, Na, Ca y Mg en la raíz y la parte aérea de las plantas de *Ligustrum vulgare*. En las condiciones del ensayo, el K y el Ca se acumularon fundamentalmente en la parte aérea de las plantas, el

Na principalmente en la raíz y el Mg presentó un contenido similar en la raíz y la parte aérea de las plantas de aligustre, siendo el único nutriente que aumentó de forma significativa respecto a su control en las raíces del suelo tratado con ST. La aplicación de lodos tratados no produjo efecto significativo en la distribución de estos elementos en las plantas.

Tabla 7. Concentración media de macronutrientes en las plantas.

Zona	Muestra	Nutrientes de la raíz (mg/kg)				Nutrientes de la parte aérea (mg/kg)			
		K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg
A	C-ST	4406a	382a	393a	637b	7056ab	62a	1383a	869ab
	Suelo+ST	5393a	478a	450a	871a	7785a	59a	1413a	1073a
B	C-CP	4895a	494a	490a	874a	5776b	49a	2073a	754b
	Suelo+CP	4839a	478a	487a	937a	5901b	48a	2022a	944ab

Valores medios seguidos por la misma letra indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La concentración media de metales pesados en raíz y parte aérea de las plantas estudiadas se recoge en la *Figura 13*. En general, los metales se acumularon principalmente en la raíz, especialmente en el caso del Cu, Ni y Cr. El Pb mostró valores similares en raíz y parte aérea. El Zn fue el metal que presentó los mayores contenidos tanto en raíz como en parte aérea. En general, las plantas cultivadas en los suelos tratados con el lodo ST mostraron mayores concentraciones de metales en comparación a sus controles. Este efecto no se observó en las plantas cultivadas en las parcelas tratadas con el lodo CP, excepto para el Cr en la parte aérea. El Cd se encontró en concentraciones inferiores al límite de detección del equipo de medida. Otros autores han observado una gran capacidad de acumulación de Zn en hojas de aligustre considerándolo como un buen bioindicador de la contaminación atmosférica (Demirayak y col., 2011). Estudios similares mostraron una mayor acumulación de Al, Fe y Ni en hojas de *Ligustrum vulgare* en comparación con *Quercus brantii* (Atabadi y col., 2011).

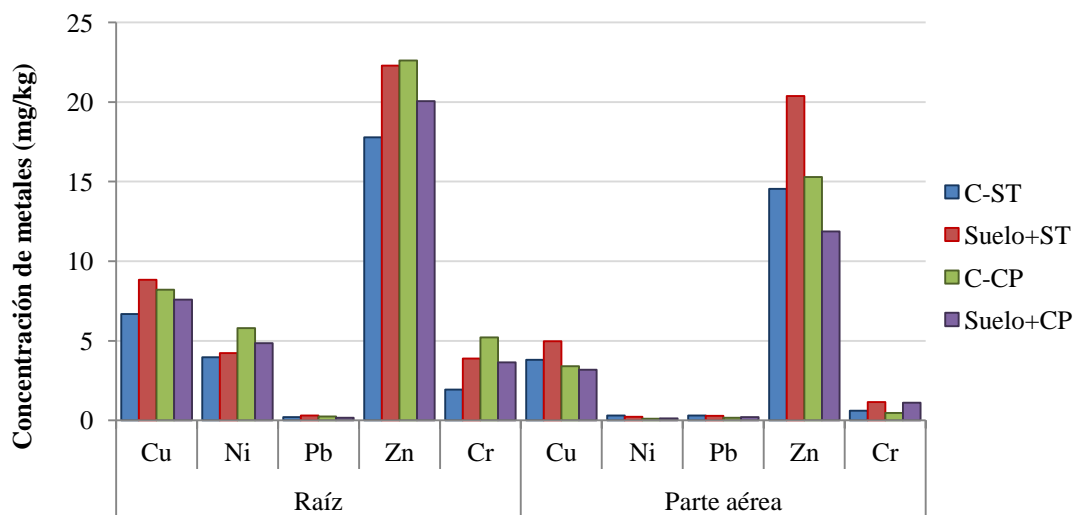


Figura 13. Concentración media de metales totales en raíz y parte aérea de las plantas de *Ligustrum vulgare*

5. CONCLUSIONES

La aplicación de lodos residuales tratados indujo una mejora de la fertilidad del suelo para los dos tipos de lodos ST y CP, produciéndose un aumento significativo del porcentaje de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como de la actividad biológica del suelo 15 meses después de la aplicación de la enmienda.

La aplicación de lodo CP no produjo efecto significativo en el contenido de metales pesados en el suelo. Respecto al tratamiento con lodo ST, se observó un incremento significativo de la concentración de Zn y Cr en el suelo, debido a la mayor concentración de estos elementos en el lodo ST. En todos los casos, la concentración obtenida está muy por debajo de los límites legislativos para este tipo de aplicaciones.

La biomasa de *Ligustrum vulgare* en las parcelas tratadas con el lodo ST experimentó un incremento de la parte aérea en relación al control. En las parcelas en las que se aplicó el lodo CP, se observó un mayor desarrollo radicular de las plantas. Dada la variabilidad de los resultados en campo, hubiera sido necesario muestrear un mayor número de plantas a fin de comprobar los resultados obtenidos.

La aplicación de lodos tratados en las condiciones del ensayo no produjo efecto significativo en la distribución de los macroelementos en las plantas. El K y el Ca se acumularon fundamentalmente en la parte aérea de las plantas, el Na principalmente en la raíz y el Mg presentó un contenido similar en la raíz y la parte aérea de las plantas de aligustre.

En general, en los suelos tratados con el lodo ST, las plantas cultivadas mostraron mayores concentraciones de metales en relación con el control. Este efecto no se observó en las parcelas tratadas con el lodo CP, con la excepción del Cr en la parte aérea. Los metales se acumularon principalmente en la raíz (especialmente en el caso del Cu, Ni y Cr), mientras que el Pb mostró valores similares en raíz y parte aérea. El Zn fue el metal que presentó los mayores contenidos tanto en raíz como en parte aérea.

Por todo lo expuesto anteriormente, la aplicación de lodos como enmienda es una estrategia adecuada para la recuperación de la fertilidad de los suelos, suponiendo además una vía de gestión sostenible de estos materiales. A fin de evitar efectos adversos debidos a la concentración de metales pesados contenidos en los lodos, es

necesario diagnosticar una adecuada dosis en función de las características del suelo y las necesidades del cultivo.

6. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al proyecto FP16-RESIDUA (IMIDRA) su financiación para la realización de este Trabajo Fin de Máster.

También a mis tutoras institucionales, M^a Carmen Lobo Bedmar y M^a del Mar Gil Díaz, así como a todo el personal de laboratorio implicado en este proyecto. Y a mi tutora académica, Concepción González Huecas.

En cuanto al Máster en Restauración de Ecosistemas, no menos importante, mi agradecimiento al director, José María Rey Benayas, al coordinador de la UAH, Pedro Villar Salvador, al coordinador de prácticas, Salvador Rebollo de la Torre, y a la asistente de Dirección, Aurora Mesa Fraile.

7. BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS:

- Acosta, Y., Ramírez, E. y Gutiérrez, E. (1995). “Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas”. [online] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/ventar006.pdf> [1 de septiembre de 2016].
- Aguilar, M.A., Ordóñez, R. y González, P. (2003). *Utilización de compost de lodos de depuradora en olivar*. Sevilla, Junta de Andalucía. [online] Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/servicios/publicaciones/detalle/43472.html> [1 de agosto de 2016].
- Aguiló, P. (2008). “El secado térmico. Una opción consolidada en el tratamiento de lodos” en Freixes i Perich, A. (coord.) *Tratamiento y valorización de fangos*. III jornadas técnicas de gestión de sistemas de saneamiento de aguas residuales, 17 y 18 de octubre de 2007, Barcelona, pp: 415-434. [online] Disponible en: https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/jornadatecnica003/volum_ponencies_es.pdf [21 de octubre de 2016].
- Alcáñiz i Baldellou, J.M., Ortiz i Perpiñà, O. y Carabassa i Closa, V. (2009). *Utilización de lodos de depuradora en restauración. Manual de aplicación en actividades extractivas y terrenos marginales*. Agència Catalana de l’Aigua. [online] Disponible en: https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/protocol_fangs.pdf [25 de octubre de 2016].
- Almorox, J., López, F. y Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. Murcia: Universidad de Murcia. [online] Disponible en: https://books.google.es/books?id=bSpiNY_nwOIC [11 de julio de 2016].
- Arenillas, L. (2012). “Diseño y ejecución de proyectos de restauración y rehabilitación de ríos en la Confederación Hidrográfica del Tajo” en *Jornadas técnicas de restauración y voluntariado 2012*. 30 y 31 de octubre de 2012, Murcia. [online] Disponible en: <https://www.chsegura.es/chs/cuenca/restauracionderios/jornadatecnica/> [12 de julio de 2016].

- Ataabadi, M, Hoodaji, M. y Najafi, P. (2011). “Biomonitoring of some heavy metal contaminations from a steel plant by above ground plants tissue” en *African Journal of Biotechnology*. Volumen 10, número 20. 16 de mayo de 2011, pp: 4127-4132. [online] Disponible en: <http://www.academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text-pdf/5BCB02C29771> [11 de julio de 2016].
- Basoinsa S.L. Ingeniería y consultoría ambiental. (2012). *Proyecto de acondicionamiento del paseo fluvial y mejora de los márgenes del tramo bajo del Río Barbadún en el Término Municipal de Muskiz*. [online] Disponible en: http://www.muskiz.org/eu-ES/Udala/Kontratatzaille-profila/Barbadun%20ibaiaren%20beheko%20tartearen%20ibaipasealekuaren/03_1_0_2468_MEMORIA.pdf [2 de septiembre de 2016].
- Bonanomi, G., D’Ascoli, R., Scotti, R., Gaglione, S.A., C, González, M., Sultana, S., Scelza, R., Rao, M.A. y Zoina, A. (2014). “Soil quality recovery and crop yield enhancement by combined application of compost and wood to vegetables grown under plastic tunnels” en *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Volumen 192. 1 de Julio de 2014, pp: 1-7.
- Bremner, J.M. (1965). “Inorganic forms of nitrogen” en Black, C.A.(ed.) *Methods of Soil Analysis*, parte 2, pp: 1179-1237. Madison: American Society of Agronomy.
- Burgos, P., Cabrera, F., López, R. y Madejón, E. (2006). “Mejora de la fertilidad de un suelo de cultivo tratado con materiales orgánicos” en *Edafología*. Volumen 13, número 2, pp. 93-101.
- Cabrera, A. (2004). *El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipos de partículas*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica. México, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla - Cholula. [online] Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf [17 de agosto de 2016].
- Cabrera, F., Hernández, M.T., García, C., Ingelmo, F., Bernal, M.P., Clemente, R., Madejón, E.M., Cabrera, A. y Cox, L. (2014). *De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad. III. Recursos orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales. 4. Residuos orgánicos en la restauración rehabilitación de*

- suelos degradados y contaminados*. España, Red Española de Compostaje. [online] Disponible en: https://books.google.es/books?id=_BdNBQAAQBAJ [1 de septiembre de 2016].
- Canal de Isabel II (1995). *Utilización agrícola de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales*. CYII, CSIC y UAM, Madrid.
 - Castañeda, A.A., Flores; H.E., Velasco, R. y Martínez, M.G. (2011). “Efectos de la aplicación de lodos orgánicos o biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas sobre el suelo y la productividad de maíz forrajero en los Altos de Jalisco, México” en Oswald, Ú. (coord.) *Retos de la investigación del agua en México*. CRIM-UNAM, Jalisco, pp: 227-237. [online] Disponible en: <http://repositorio.cualtos.udg.mx:8080/jspui/handle/123456789/398> [1 de septiembre de 2016].
 - Celik, I., Ortas, I. y Kilic, S. (2004). “Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil” en *Soil and Tillage Research*. Volumen 78, número 1. Julio de 2004, pp: 59-67.
 - Del Río, A., Domingo, J., Sánchez, V., Rodríguez, E.F., García, L., Guillem, A. y Zumalacárregui, C. (2012). “Recuperación de Zonas Húmedas” Fundación Banco Santander en *Manuales de Desarrollo Sostenible*, capítulo 12. [online] Disponible en: <https://www.fundacionbancosantander.com/es/manuales-de-desarrollo-sostenible-n%C2%BA-12> [2 de septiembre de 2016].
 - Demirayak, A., Kutbay, H.G., Kilic, D., Bilgin, A. y Hüsetinova, R. (2011). “Heavy Metal Accumulation in Some Natural and Exotic Plants in Samsun City” en *Ekoloji*. Volumen 20, número 79. Enero de 2011, pp: 1-11. [online] Disponible en: <http://www.ekoloji.com.tr/resimler/79-1.pdf> [12 de agosto de 2016].
 - Elías, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Segunda edición, Ediciones Díaz de Santos, España. [online] Disponible en: <https://books.google.es/books?isbn=8499693660> [20 de octubre de 2016].
 - EPA (2004). *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*. United States Environmental Protection Agency 832-R-04-001. [online] Disponible en: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/primer.pdf> [20 de octubre de 2016].

- FAO (2003). “Materia orgánica y actividad biológica” en *Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible*. [online] Disponible en: http://www.fao.org/ag/ca/Training_Materials/CD27-Spanish/ba/organic_matter.pdf [10 de agosto de 2016].
- Flotats, X y Solé, F. (2008). “Situación actual en el tratamiento de los residuos orgánicos: aspectos científicos, económicos y legislativos” en Moreno, J. y Moral, R. (eds.) *Compostaje*, bloque 1, capítulo 2, pp: 43-74. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- García, C. y Lobo, M.C. (2008). “Rehabilitación de suelos degradados y contaminados mediante la aplicación de compost” en Moreno, J. y Moral, R. (eds.) *Compostaje*, bloque 5, capítulo 18, pp: 425-448. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- García, S., Cuevas, G., Martínez, F. y Walter, I. (2000). “Efecto sobre la cubierta vegetal de la aplicación de residuos orgánicos urbanos en un suelo degradado de la Comunidad de Madrid” en *Ecología*. Número 145, pp: 79-87. [online] Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_14_07_tcm7-45848.pdf [2 de octubre de 2016].
- Gascó, G. y Lobo, M.C. (2007). “Composition of a Spanish sewage sludge and effects on treated soil and olive trees” en *Waste Management*. Volumen 27, número 11, pp: 1494-1500.
- Gascó, G., Lobo, M.C. y Gerrero, F. (2005). “Land application of sewage sludge: A soil columns study” en *Water SA*. Volumen 31, número 3. Julio de 2005, pp: 309-318. [online] Disponible en: <http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/download/5220/12776> [21 de octubre de 2016].
- Gul, S., Naz, A., Fareed, I. y Irshad, M. (2015). “Reducing Heavy Metals Extraction from Contaminated Soils Using Organic and Inorganic Amendments – a Review” en *Polish Journal of Environmental Studies*. Volumen 24, número 3, pp: 1423-1426. [online] Disponible en: <http://www.pjoes.com/abstracts/2015/Vol24/No03/54.html> [5 de agosto de 2016].
- Hernando, S., Lobo, M.C. y Polo, A. (1989). “Effect of the application of a municipal refuse compost on the physical and chemical properties of a soil” en

- Science of The Total Environment*. Volúmenes 81-82. Junio de 1989, pp: 598-596.
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R. y Bello, S. et al (2006). “La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso” en *Idesia*. Volumen 24, número 1. Enero-abril de 2006, pp: 49-61. [online] Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf> [5 de agosto de 2016].
 - Lobo, M.C. (2007). “Procesos de degradación del suelo” en *Procesos de degradación y recuperación de suelos*, capítulo 2, pp: 29-39. CIEMAT.
 - Lobo, M.C. (2012). “Degradación de suelos” en Millán, R. y Lobo, M.C. (eds.) *Evaluación y recuperación de emplazamientos degradados y/o contaminados*, capítulo 5, pp: 81-93. CIEMAT.
 - Lobo, M.C., Martínez-Íñigo, M.J., Pérez-Sanz, A., Cabezas, G., Plaza, A., Vicente, M.A. y Sastre-Conde, I. (2012). “Evaluation of the Biological Activity in a Gypsiferous Soil Co-Amended with Residues” en Trasar-Cepeda, C., Hernández, T., García, C., Rad, C. y González-Carcedo, S. (eds.) *Soil Enzymology in the Recycling of Organic Wastes and Environmental Restoration*, Serie Environmental Science and Engineering. 29 de septiembre de 2011, pp: 195-210. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
 - Lobo, M.C., Plaza, A., Sastre-Conde, I., Vicente, M.A. y Cabezas, J.G. (2010). “Aplicación de lodos residuales para la recuperación de cubiertas edáficas en vertederos” en Hernández, A.J. y Bartolomé, C (eds.) *Estudio multidisciplinar de vertederos sellados. Caracterización y pautas de recuperación*. Capítulo 12, pp: 171-181. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.
 - López, R.A. (2002). *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Mérida, Universidad de Los Andes. [online] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/264311522> [8 de julio de 2016].
 - López, R., Ostos, J.C. y Carbera, F. (2008). “Uso de composts de residuos urbanos en sustratos de vivero forestal” en Huerta, O., Martínez, F.X. y López, M. (eds.), *Proceso y destino del compost, formación, información e interrelaciones entre los agentes del sector. Ponencias y comunicaciones de las I Jornadas de la Red Española de Compostaje: 6, 7, 8 y 9 de febrero de 2008*. Red Española de Compostaje, Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, pp: 133-137.

- MAGRAMA (2013). *Gestión de biorresiduos de competencia municipal: guía para la implantación de la recogida separada y tratamiento de la fracción orgánica*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. [online] Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/guia_mo_def_tcm7-285227.pdf [20 de octubre de 2016].
- MAPA (1994). *Métodos oficiales de análisis*, volumen 3, pp: 205-324. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Marqués, M.J. (2006). “El papel de las enmiendas orgánicas en el control de la erosión” en Bienes, R. y Marqués M.J. (eds.). *Conservación del medio ambiente: revegetación, recuperación del suelo y empleo de residuos en el control de la erosión*, capítulo XII, pp: 181-198. [online] Disponible en: https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_profesores/prof121647/docencia/Libro%20Conservacion%20Medio%20Ambiente.pdf [31 de agosto de 2016].
- Martín, S.M., Vaca, P.R., Lugo, F.J., Esteller, M.V. y Garrido S.E. (2002). “Aplicación de lodos residuales municipales en cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en suelos agrícolas del Valle de Toluca” en *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. AIDIS, 27 de octubre - 1 de noviembre de 2002, Cancún.
- Mata-Álvarez, J, Benabdallah, T. y Astals, S. (2008). “Digestión anaerobia de fangos: posibles mejoras en su rendimiento” en Freixes i Perich, A. (coord.) *Tratamiento y valorización de fangos*. III jornadas técnicas de gestión de sistemas de saneamiento de aguas residuales, 17 y 18 de octubre de 2007, Barcelona, pp: 91-105. [online] Disponible en: https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/jornadatecnica003/volum_ponencias_es.pdf [21 de octubre de 2016].
- Miralles, R., Beltrán, E.M., Porcel, M.A., Beringola, M.L., Valero, J., Calvo, R. y Delgado, M.M. (2002). “Influencia de tres tipos de lodo de estaciones depuradoras en el desarrollo de estaquillas de olivo” en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Volumen 18, número 4. Octubre de 2002, pp: 163-169. [online] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/370/37018402.pdf> [21 de octubre de 2016].
- Miralles, R., Beltrán, E.M., Porcel, M.A., Beringola, M.L., Valero, J., Calvo, R. y Delgado, M.M. (2003). “Disponibilidad de nutrientes por el aporte de tres

- tipos de lodo de estaciones depuradoras” en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Volumen 19, número 3. Agosto de 2003, pp: 125-134. [online] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/370/37019303.pdf> [21 de octubre de 2016].
- Pérez, R.A., Sánchez-Brunete, C., Albero, B., Miguel, E., Tadeo, J.L., Alonso, J. y Lobo, M.C. (2016). “Quality Assessment of Three Industry-Derived Organic Amendments for Agricultural Use” en *Compost Science & Utilization*. Volumen 24, número 3. 18 de febrero de 2016, pp: 190-202.
 - Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Tercera edición, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
 - Rossini, S. y Valdés, B. (2004). “*Ligustrum lucidum* Ait. f. Leaves as a Bioindicator of the Air-Quality in a Mediterranean City” en *Environmental Monitoring and Assessment*. Volumen 96, número 1. Agosto de 2004, pp: 221-232.
 - Sastre-Conde, I., Cabezas, J.G., Guerrero, A., Vicente, M.A. y Lobo, M.C. (2007). “Evaluation of the soil biological activity in a remediation soil assay using organic amendments and vegetal cover” en *Science of the Total Environment*. Volumen 378, números 1-2. 25 de mayo de 2007, pp: 205-208.
 - Sastre-Conde, I., Lobo, M.C., Beltrán-Hernández, R.I. y Poggi-Varaldo, H.M. (2015). “Remediation of saline soils by a two-step process: Washing and amendment with sludge” en *Geoderma*. Volúmenes 247-248. Julio de 2015, pp: 140-150.
 - Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A. y Rao, M.A. (2015). “Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems” en *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Volumen 15, número 2, pp: 333-352. [online] Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/jsspn/v15n2/aop3115.pdf> [21 de octubre de 2016].
 - Sierra, C. y Rojas, C. (2002). “La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos” en Rojas, C., Novoa, R., Squella, F., Carrasco, J. y Sierra, C. (eds.) *Curso Tecnologías y Prácticas en el Manejo de los Recursos Naturales para la Recuperación de los Suelos Degradados*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 9-12 de abril de 2002, Santiago, pp: 5-26. [online] Disponible en:

- <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR28122.pdf> [5 de agosto de 2016].
- Soliva, M. y Huerta, O. (2004). *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. [online] Disponible en: http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentacio/articulos_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf [12 de agosto de 2016].
 - Soliva, M., López, M. y Huerta, O (2008). “Antecedentes y fundamentos del proceso de compostaje” en Moreno, J. y Moral, R. (eds.) *Compostaje*, bloque 2, capítulo 3, pp: 75-92. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
 - USDA (United States Department of Agriculture) (1993). *Soil Survey Manual*. [online] Disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054262 [13 de octubre de 2016].
 - Wang, Q.R., Cuis Y.S., Liu, X.M., Dong, Y.T., y Christie, P. (2003). “Soil Contamination and Plant Uptake of Heavy Metals at Polluted Sites in China” en *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. Volumen A38, número 53. Mayo de 2003, pp: 823-838. [online] Disponible en: <http://pure.qub.ac.uk/portal/files/379527/Wang%20et%20al%202003.pdf> [21 de octubre de 2016].
 - Zhou, G., Li, L., Li, H. y He, Y. (2009). “Microorganism-plant Combined Bioremediation on Heavy Metal Contaminated Soil In the Industrial District” en *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. Volumen 3. 4-5 de julio de 2009, pp: 273-276. [online] Disponible en: <http://www.hjxf.net/uploadfile/2012/0917/20120917025839229.pdf> [21 de octubre de 2016].

LEGISLACIÓN:

- Directiva 86/278/CEE, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de

- depuradora en agricultura. DOUE nº 181 de 04/07/1986. [online] Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:l28088> [29 de junio de 2016].
- Directiva 91/271/CEE, de 21 de mayo, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOUE nº 135 de 30/05/1991. [online] Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV%3A128008> [29 de junio de 2016].
 - Orden 2770/2006, de 11 de agosto, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se procede al establecimiento de niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos contaminados de la Comunidad de Madrid. [online] Disponible en: http://www.madrid.org/wleg_pub/servlet/Servidor?nmnorma=4097 [21 de octubre de 2016].
 - Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. BOE nº 142 de 14/06/2013. [online] Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/06/14/pdfs/BOE-A-2013-6414.pdf> [29 de junio de 2016].
 - Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE nº 262 de 01/11/1990. [online] Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf> [29 de junio de 2016].

PÁGINAS WEB:

- Anthos, Flora Ibérica. [online] Disponible en: <http://www.anthos.es/> [26 de octubre de 2016].
- Flora vascular, CXXXIII. Oleaceae - 5. Ligustrum, p: 157. [online] Disponible en: <http://www.floravascular.com/index.php?spp=Ligustrum%20vulgare> [26 de octubre de 2016].
- MAGRAMA. [online] Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/> [26 de octubre de 2016].
- Vivers Carex. [online] Disponible en: <http://www.carex.cat/es/vivers-carex/catalogo/ligustrum-vulgare-.aspx> [26 de octubre de 2016].

8. ANEXO

Anexo I. Esquema de la parcela de plantación de las 6 especies de arbustos

N	C-CP2				C-CP1				Suelo-CP2				Suelo-CP1				28m	C-ST2				C-ST1				Suelo-ST2				Suelo-ST1			
	7 m	1m	7 m	2m	7 m	1m	7 m	2m	7 m	1m	7 m	2m	7 m	1m	7 m	2m		7 m	1m	7 m	2m	7 m	1m	7 m	2m	7 m	1m	7 m	2m				
2,4m	6		5				6				6				5		6		5				6				5				5		
2,4m	4		6				4				4				6		4		6				4				6				4		
2,4m	2		4				2				2				4		2		4				2				2				4		
2,4m	1		2				1				1				2		1		2				1				1				2		
2,4m	3		1				3				3				1		3		1				3				1				3		
2,4m	5		3				5				5				3		5		3				5				3				5		

Nº 1: *Prunus spinosa* L. (endrino), en 3 líneas de 10 plantones (240 plantas en total).

Nº 2: *Crataegus monogyna* Jacq. (majuelo), en 3 líneas de 10 plantones (240 plantas en total).

Nº 3: *Rosmarinus officinalis* L. (romero), en 3 líneas de 20 plantones (480 plantas en total).

Nº 4: *Spartium junceum* L. (retama de olor), en 3 líneas de 5 plantones (120 plantas en total).

Nº 5: *Rhamnus alaternus* L. (aladierno), en 3 líneas de 7 plantones (168 plantas en total).

Nº 6: *Ligustrum vulgare* L. (aligustre), en 3 líneas de 15 plantones (360 plantas en total).