

Efecto residual provocado por dos lodos de depuradora procedentes de un ensayo de fitorremediación con cardo en un cultivo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) en Madrid

Residual effect of two sewage sludges from a phytoremediation test with thistle on camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) in Madrid

Maria del Mar Delgado ¹, Carmen Lobo ², Antonio Plaza ², Aníbal Capuano ³, Gonzalo Hernando ³, Javier Prieto ³, Rosario Miralles de Imperial ¹, José Valero Martín ¹

Originales: *Recepción*: 26/03/2015 - *Aceptación*: 02/12/2015

RESUMEN

Se realizó un ensayo de campo con camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz para estudiar su comportamiento en rotación de cultivo con un ensayo de fitorremediación con cardo (*Cynara cardunculus* L.), en un suelo representativo de un agroecosistema semiárido. El diseño experimental constó de parcelas sembradas con *Camelina sativa* (L.) Crantz, aprovechando la fertilización residual de enmiendas con dosis de lodo secado térmicamente (ST50) y (ST100) y de lodo compostado con resto de poda (CP50) y (CP100) comparados con un suelo control (T), en rotación de cultivo con un ensayo de fitorremediación con cardo. En términos generales, la fertilización residual con el lodo secado térmicamente (ST50) mejora la respuesta del cultivo, aumentando los valores de producción respecto del control y de la fertilización residual con lodo compostado con resto de poda. También con el efecto residual del lodo secado térmicamente (ST50) se consigue un aprovechamiento más eficaz del nitrógeno aplicado (proteína) y un mayor contenido en grasa. Respecto de las propiedades físico-químicas del suelo los resultados obtenidos muestran que los suelos fertilizados con lodos experimentaron un incremento de pH, materia orgánica, P, K, Ca, Mg y Na. La concentración de micronutrientes Cu, Zn y Ni y metales pesados Cr, Cd y Pb aumentó respecto del testigo, pero no hubo riesgos de contaminación.

Palabras clave

Camelina sativa (L.) Crantz • *Cynara cardunculus* • lodo secado térmicamente • lodo compostado con resto de poda

-
- 1 INIA, Departamento de Medio Ambiente. Ctra. de La Coruña Km. 7.5, 28040 Madrid, España. delgado@inia.es
 - 2 IMIDRA, Departamento Agroambiental. A-2 Km 38.2 28000. Madrid, España
 - 3 Camelina Company S.L. Spain, Vía limite 7, 28029 Madrid. España

ABSTRACT

A field trial with *Camelina sativa* (L.) Crantz was performed to study their behavior following a residual of previous crop fertilization in a representative soil of a semiarid agroecosystem. The experimental design consisted of plots sown with *Camelina sativa* (L.) Crantz in crop rotation with *Cynara cardunculus* L. and using their residual fertilizer amendments (ST50) and (ST100) thermally-dried sewage sludge and (CP50) and (CP100) composted sewage sludge with pruning waste, which were compared with a control soil (control). Overall, fertilization thermally-dried sewage sludge (ST50) improved crop response, increasing production values compared to control and fertilization with composted sewage sludge with pruning waste. Moreover, with the residual effect of the thermally-dried sewage sludge (ST50) a more efficient utilization of the applied nitrogen (protein) is achieved, as well as a higher fat content. Regarding the physicochemical properties of soil, the results show that the soil fertilized with sludge had an increase of pH, organic matter, P, K, Ca, Mg and Na. The concentration of micronutrients Cu, Zn and Ni and heavy metals Cr, Cd and Pb increase over the control, but there was no risk of contamination.

Keywords

Camelina sativa (L.) Crantz • *Cynara cardunculus* L. • thermally-dried sewage sludge • composted sewage sludge with pruning waste

INTRODUCCIÓN

La camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) es una planta oleaginosa de la familia de las *Brassicaceae*, con bajos requerimientos de cultivo y cierta resistencia a la sequía, que puede constituir una alternativa a otros cultivos de secano desarrollados en Madrid. Estudios anteriores reflejaron que el cultivo de camelina puede desarrollarse sin fertilización, cuando este se implante después de un cultivo que haya dejado en el suelo niveles residuales adecuados en N, P y K (13).

En este sentido, se realizó ensayos de invernadero en el INIA de Madrid para evaluar la respuesta de un cultivo de camelina cv. "Calena", a la fertilización residual, después de las extracciones realizadas por un cultivo anterior (colza) al que se había aplicado lodo de depuradora, secado térmicamente o fertilizante

mineral. Los resultados reflejaron, que la camelina aprovecha la fertilización orgánica-mineral del cultivo anterior, por lo que podría sembrarse en una rotación de cultivo, aprovechando el efecto residual de la fertilización del cultivo anterior, sin tener que aportar un nuevo abonado (25).

La aplicación de lodos secados térmicamente y compostados se contempla como una opción eficaz para mejorar la calidad de los suelos e incrementar su fertilidad. En este contexto, la utilización de lodos secados térmicamente y compostados como fertilizantes o enmendantes orgánicos de suelos agrícolas, está siendo ampliamente usado como sistema de gestión más económica, ya que contiene elementos nutrientes como: N, P, K, Ca y Mg en ciclos naturales agrícolas (10).

La Orden AAA/1072/2013 recién aprobada, del 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario (5), tiene por objeto actualizar el contenido del Registro Nacional de Lodos y también el Real Decreto 506/2013, del 28 de junio, sobre productos fertilizantes (6). Este señala que la protección del suelo constituye un objetivo prioritario en un buen abonado, para garantizar su fertilidad y su valor agronómico, presente y futuro. En este sentido, la aplicación de lodos de depuradora como fertilizante orgánico-mineral en cultivos oleaginosos y sus efectos en el suelo y planta han sido estudiados estos últimos años en ensayos de invernadero con girasol y colza (23, 24). Johnson y Gesch (2013) en ensayos en invernadero y tiestos estudiaron la respuesta de camelina a la fertilización con nitrógeno.

No obstante, la realización de estudios de campo a largo plazo proporciona una información extremadamente valiosa acerca de la capacidad fertilizante del residuo aplicado y la influencia que ejerce sobre el suelo y las plantas en condiciones reales (8, 9).

Gugely y Falk (2006) en ensayos de campo estudiaron el requerimiento de nutrientes en este cultivo, para establecer las dosis adecuadas de fertilizantes y el efecto en el rendimiento en grano y su calidad por medio de su contenido de proteína y aceite. También Imbrea *et al.* (2011) en ensayos en campo evaluaron la influencia de distintos niveles de fertilización mineral con nitrógeno y fósforo, así como diferentes densidades de siembra en el rendimiento en grano de camelina.

Objetivo

Estudiar la posible utilización del efecto residual de lodos de depuradoras en un cultivo de *Camelina sativa* (L.) Crantz en rotación de cultivo con cardo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un experimento en la finca experimental "La Canaleja" perteneciente al INIA situada en el término municipal de Alcalá de Henares (Madrid). Sus coordenadas geográficas son 40°30' de latitud norte y 3°17' de longitud oeste y se encuentra a una altitud media de 600 m sobre el nivel del mar. El suelo de esta finca experimental se asienta sobre un material originario de arenas, cantos y gravas, con presencia de un horizonte cálcico a menos de un metro de profundidad. Se puede clasificar como Haploxeralf calciortidico según criterios taxonómicos (31).

La textura del suelo es franco arcillosa, con un contenido en carbonatos en torno al 5% y las características físico-químicas media analizadas sobre un análisis de diez submuestras de la parcela seleccionada para el ensayo son: pH 8,5, conductividad eléctrica 0,13 dSm⁻¹, Nitrógeno Total y Carbono oxidable 0,17 y 1,44% respectivamente, C/N 1,44, N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ de 6,45 y 14,70 mgkg⁻¹ respectivamente y metales pesados Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd con 9, 50, 9, 75, 3 y 0,005 mgkg⁻¹.

Las características físico-químicas de los lodos empleados en el ensayo anterior de fitorremediación de cardo se muestran en la tabla 1 (pág. 16).

El lodo secado térmicamente fue suministrado por la empresa SUFI y procede de la Planta de Secado de biosólidos en la E.R.A.R. Sur de Madrid y el lodo compostado con resto de poda 1:1 procedente de Granada y distribuido por la empresa Biomasa del Guadalquivir.

La incorporación de los lodos fue realizada en septiembre de 2010 mediante labores con cultivador y en octubre se procedió a la siembra del cardo.

Tabla 1. Características del lodo compost con resto de poda y del lodo secado térmicamente (media±desviación estándar).**Table 1.** Composted sewage sludge with pruning waste and sewage sludge thermally- dried characteristics (mean±standard deviation).

Parámetro	Lodo compost resto de poda	Lodo secado térmico	Límites UE pH >7
pH (1:2,5 H ₂ O)	7,5±0,1	6,70±0,1	
C.E. (dSm ⁻¹ 1:5,0 H ₂ O)	2,9±0,5	4,6±0,5	
Humedad (%)	32,71±3,7	8,87±0,7	
Carbono orgánico total (gkg ⁻¹)	225,0±34,6	259,4±34,6	
Nitrógeno Kjeldahl (gkg ⁻¹)	16,0±5,6	40,5±6,0	
C/N	14,06	5,75	
Fósforo -P- (mgkg ⁻¹)	288,0±115	400±100	
Potasio -K- (mgkg ⁻¹)	2034,0±200	974±200	
Calcio -Ca- (mgkg ⁻¹)	4705,0±400	2770±4000	
Sodio -Na (mgkg ⁻¹)	352,0±200	552±100	
Magnesio -Mg- (mgkg ⁻¹)	883,0±200	970±200	
Cobre -Cu- (mgkg ⁻¹)	170,5±68,5	385,5±68,5	1750,0
Plomo -Pb- (mgkg ⁻¹)	78,0±25	219,0±60,8	1200,0
Cromo -Cr- (mgkg ⁻¹)	248,3±3,1	280,0±3,1	1500,0
Zinc -Zn- (mgkg ⁻¹)	1602,5±193	1118,5±193	4000,0
Níquel -Ni- (mgkg ⁻¹)	33,2±6,5	73,0±10,4	400,0
Cadmio -Cd- (mgkg ⁻¹)	0,4±0,2	1,9±0,2	40,0

El ensayo con cardo se realizó durante dos campañas (2010-2012) con análisis de suelos y materia vegetal, para el estudio de la capacidad de fitorremediación de esta planta.

Posteriormente, en este suelo se procedió al estudio del cultivo de la camelina y debido a que las condiciones meteorológicas específicas de cada campaña tienen un efecto muy marcado sobre el cultivo, se tomaron de la estación existente en la propia finca, las temperaturas y las precipitaciones medias mensuales del año hidrológico de experimentación para el cultivo de camelina (figura 1, pág. 17). Esta figura representa las temperaturas medias mensuales registradas durante el periodo de ensayo, observándose que en la época de otoño las temperaturas medias mensuales fueron superiores (20,3°C y 15,2°C septiembre y octubre respectivamente) con respecto a las

alcanzadas en primavera (11,66°C en abril y 13,74°C en mayo).

Respecto de las precipitaciones medias registradas, las lluvias estuvieron concentradas en primavera, sobre todo en marzo con 91,2 mm y en los meses de otoño principalmente, octubre y noviembre con 67,7 mm y 57,3 mm respectivamente.

Diseño experimental

El experimento constó de 18 parcelas de 200 m² (20 m x 10 m) sembradas con *Camelina sativa* (L.) Crantz (proporcionada por la empresa Camelina Company España S. L.) en rotación de cultivo con cardo (*Cynara cardunculus* L.), aprovechando su fertilización residual de enmiendas con 50 (ST50) y 100 (ST100) t/ha de lodo secado térmicamente y 50 (CP50) y 100 (CP100) de lodo compostado con restos de poda, que se compararon con un suelo control (testigo).

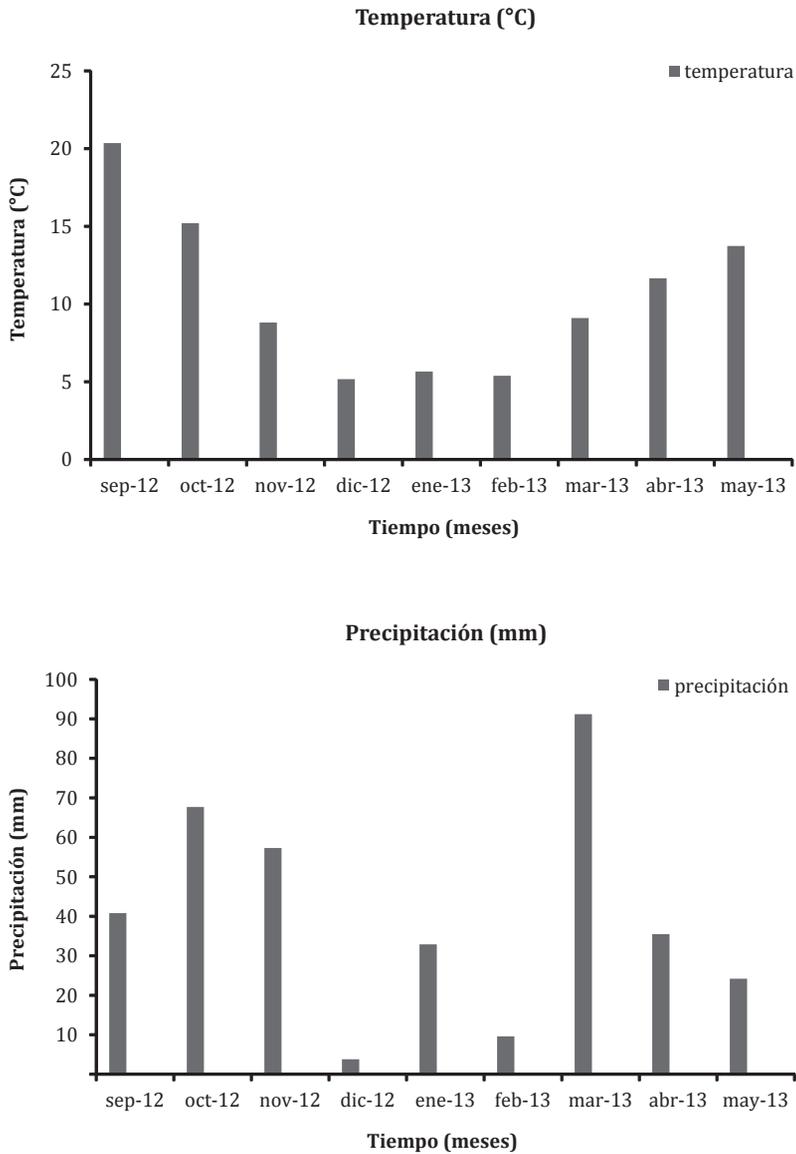


Figura 1. Temperaturas medias mensuales y precipitaciones medias mensuales del primer año hidrológico de experimentación.

Figure 1. Monthly average temperatures and monthly average rainfall of first hydrological year of experimentation.

La siembra de la *Camelina sativa* (L.) Crantz se realizó mecánicamente, con una sembradora de precisión para parcelas experimentales a finales de noviembre, con una densidad de siembra de 8 kg/ha, que equivale aproximadamente a 3,2- 3,6 kg de semilla.

El diseño fue mediante bloques al azar con tres repeticiones, en parcelas anteriores de cardo enmendado con dos dosis de lodos de depuradora tratados (secado térmico y compost de lodo con restos de poda).

En primavera se aplicó un tratamiento herbicida de Lontrel (clopiralida 42,5% p/v) en todas las parcelas.

Antes de cosechar las parcelas se recogió muestras de plantas. El número de plantas son las recogidas dentro de un marco de hierro de un m² puesto al azar en cada unidad experimental para posteriormente determinar los siguientes parámetros: rendimiento en materia seca (%), rendimiento en semillas (%) y calidad de las semillas (peso de 1000 semillas).

También se comprobó la eficiencia del fertilizante residual proporcionada por el lodo (cantidad de proteína y grasa de las semillas). El contenido en proteína (%), calculado como N-Kjeldahl x 6,25 y su contenido en materia grasa (%) por el método de Resonancia Magnética Nuclear (18).

Se seleccionó un equipo de barrenas Eijkelkamp de media caña para muestrear los suelos antes de la siembra y después de la cosecha, para comprobar la evolución de los parámetros en el suelo de la camelina en los diferentes tratamientos y en las dos profundidades 0-20 cm y 20-40 cm.

Los análisis realizados, tras secado al aire y tamizado a 2 mm de luz de malla, fueron: el pH se midió en una suspensión residuo/agua (1:2,5) mediante un electrodo de vidrio y realizando la medida en un pH-metro CRISON micro pH 2001 con compensación automática de temperatura.

Para medir la conductividad eléctrica (dSm⁻¹), se utilizó un conductímetro CRISON micro CM 2201 en un extracto acuoso (1:5,0) (2).

El método para analizar el carbono orgánico oxidable fue el de Walkey-Black consistente en la oxidación de la muestra con dicromato potásico por vía húmeda, utilizando un factor de oxidación de 1,29 ya que se supone que solo el 77% del carbono orgánico presente en la muestra fue oxidado en las condiciones experimentales empleadas, *i. e.* mezclado de K₂Cr₂O₇ 1 N y H₂SO₄ concentrado en proporción 2:1 y media hora digerido a temperatura ambiente (2).

La concentración de nitrógeno total se determinó siguiendo el método Kjeldahl, que consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico concentrado. El nitrógeno orgánico se mineraliza, pasando a forma amoniacal, que junto con el amonio ya existente en la muestra se valora por colorimetría (17).

El nitrógeno amoniacal y en forma de nitrato, se analizó siguiendo el método Bremner mediante una destilación con arrastre de vapor (7). El contenido de P, K, Ca, Mg y Na, se llevó a cabo según el método recogido en MAPA (1994). Los metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cu, Pb y Cd) se midieron por espectrofotometría de emisión de plasma previa digestión ácida (HNO₃/HCL, 1:3) (32).

Las propiedades físicas de los suelos como: la porosidad, capacidad de campo y punto de marchitamiento fueron medidos también antes de la siembra al final de la cosecha, solo a la profundidad de 0-20 cm debido a que estas propiedades físicas se miden en la capa arable (20 cm de profundidad) según el método recogido en MAPA (1994).

Las características físico-químicas de los lodos empleados en el cultivo anterior con cardo (tabla 1, pág. 16) se han analizado utilizando los mismos métodos que los expuestos para el suelo.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza de múltiple rango (ANOVA) de dos factores: tratamientos; lodo secado térmicamente y lodo compostado con restos de poda y dosis de 50 (ST50) y 100 (ST100) t/ha. Se utiliza la prueba estadística LSD para comparar su media ($P \leq 0,05$), utilizando el programa estadístico Statgraphics (29).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos sobre el cultivo

Con el fin de analizar conjuntamente los efectos de los tratamientos ejercidos en el año de experimento, sobre el rendimiento de cosecha, se ha calculado la producción total, tanto de semillas como de materia seca, de cada uno de los tratamientos, así como el porcentaje de variación respecto de control. También se ha estudiado su contenido en proteína y grasa de cada uno de ellos (tabla 2).

Tabla 2. Rendimiento de materia seca y de semilla de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) (kg ha^{-1}) en los diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y variación respecto del testigo (%t). Altura de planta (m), peso de mil semillas (g), proteína (%) y grasa (%).

Table 2. Dry matter yield and seed yield of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) (kg ha^{-1}) according to the different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and variation compared with the control (%t). Plant height (m), thousand seeds weight (g), protein (%) and fat (%).

Tratamiento	Rendimiento de materia seca (Kgha^{-1})		Rendimiento de semilla (Kgha^{-1})		Altura de planta (m)	Peso de mil semillas (g)	Proteína (%)	Grasa (%)
		%T		%T				
Testigo	8726.67a		1009.26a		1.03a	1.25a	27.23a	35.24a
ST50	9250.00e	6	1535.49b	34	1.09a	1.30a	28.07a	35.56a
ST100	7750.00c	-13	1319.30c	23	1.04a	1.28a	27.51a	34.87a
CP50	9410.00d	7	1199.91d	16	1.05a	1.29a	27.49a	34.61a
CP100	7753.33b	-12	1394.05e	28	0.98a	1.28a	27.50a	34.64a
Valor p	*		*		ns	ns	ns	ns

* $p \leq 0,05$ significativo. ns; no significativo ($p \geq 0,05$).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD ($p \leq 0,05$).

* $p \leq 0.05$ significant difference. ns; no significant difference ($p \geq 0.05$).

Different letters in the row indicate significant differences according to LSD test ($p \leq 0.05$).

Los resultados indican que la variación porcentual en el rendimiento de semillas, respecto del testigo se alcanzó en las parcelas fertilizadas con dosis 50 t/ha de lodo secado térmicamente (ST50) de un cultivo original de cardo (2010-2012) y ahora en rotación de cultivo con la camelina. En dicho tratamiento el rendimiento de materia seca fue levemente menor que con la dosis CP50, carente de efecto sobre el rendimiento de semillas.

Aunque no se encontró diferencias significativas en los tratamientos respecto del porcentaje de proteína y grasa, es posible inferir que la dosis ST 50 presenta una tendencia positiva respecto de los otros tratamientos (tabla 2, pág. 19). Mayor cantidad total de semillas y de materia seca, así como el mayor contenido en proteína y grasa se alcanzó en las parcelas fertilizadas con dosis 50 t/ha de lodo secado térmicamente (ST50) de un cultivo original de cardo (2010-2012) y ahora en rotación de cultivo con la camelina.

Estos resultados están de acuerdo con lo establecido por Delgado *et al.* (2012) y Bautista Cruz *et al.* (2014), quienes indicaron que la aplicación de lodo de depuradora puede lograr un rendimiento de cosecha satisfactorio y resulta posible sustituir la fertilización mineral, parcial o totalmente. Sin embargo, la aplicación de dosis superiores a la óptima, calculada en función de las necesidades de fertilización del cultivo, las características del suelo y las condiciones ambientales, no siempre supone un aumento significativo de la producción, sino que conlleva un riesgo de contaminación. Esto se puede observar en el efecto negativo que tienen las dosis altas de lodos tanto secado térmico como compostado respecto del control en el rendimiento en materia seca (tabla 2, pág. 19).

Respecto del estudio estadístico se observó que solo existen diferencias significativas $p \leq 0,05$ para el cultivo de camelina respecto

de su rendimiento de materia seca como rendimiento en semillas.

La evaluación de la calidad de la semilla obtenida en cada cosecha se ha realizado en función de un parámetro relacionado con el peso de las semillas (peso de mil semillas). Según Molina (1989), el peso de las semillas es función de la etapa de maduración y de la velocidad de crecimiento de las semillas y se considera un componente de la cosecha relativamente estable bajo condiciones normales de cultivo.

Un peso de semillas menor indica un descenso en los aportes de compuestos asimilados; debido especialmente a condiciones ambientales desfavorables como una mayor sequedad y temperatura al final del ciclo del cultivo (16).

Los valores medios del peso de mil semillas se muestran en la tabla 2 (pág. 19), observándose que el mayor peso (1,3 g) se obtuvo en el suelo fertilizado con lodo secado térmicamente (ST50) cuya dosis fue 50 t/ha.

También en la tabla 2 (pág. 19) se muestra la altura media de la plantas respecto de las distintas dosis de efecto residual del lodo ensayado. El mayor valor alcanzado (1,09 m) fue el proveniente del suelo fertilizado con lodo secado térmicamente (ST50) cuya dosis fue 50 t/ha (22).

Los resultados obtenidos respecto de la altura y el peso de mil semillas de la camelina estudiada, se encuentran dentro del rango de los datos de altura (de 0,30 a 1,20 m) y peso de mil semillas (de 0,8 a 2 g), encontrados y expuestos por Gutiérrez y Albalat (2013), después de una amplia revisión bibliográfica.

Efectos sobre el suelo

La evolución de las propiedades químicas del suelo de un cultivo de camelina en rotación de cultivo de cardo, muestran el comportamiento de la aplicación de lodo secado térmicamente y lodo compostado con resto de poda.

En la figura 2 (pág. 22) se muestra la evolución del pH y la conductividad eléctrica (CE) en el suelo de camelina con diferentes tratamientos y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm). Se puede observar que la tendencia encontrada en la aplicación de lodo fue de un descenso del pH del suelo frente al testigo, al contrario del efecto en la CE que lo hizo aumentar. Estos efectos también se constataron en ensayos realizados con girasol y cardo, (23, 25).

La evolución del N-NH_4^+ y N-NO_3^- en el suelo de camelina aumentó con la incorporación de lodo de depuradora siendo el lodo secado térmico (ST100) el que adquirió mayor proporción (figura 3, pág. 23).

Respecto del contenido de la materia orgánica (MO) (carbono oxidable $\times 1,72$) en el suelo (figura 4, pág. 24), los suelos donde se ha incorporado lodos son los que tienen un contenido mayor, existiendo diferencias significativas para los tratamientos (ST100), (CP50) y (ST100) (12).

También se estudió la evolución de los nutrientes N, P, K Ca, Mg y Na en especial de los tres primeros, por ser considerados los nutrientes fundamentales para las plantas. En el caso del nitrógeno el mayor contenido se encuentra en el suelo donde se ha aplicado la dosis más alta de lodo secado térmico (ST100) y solo aparecen diferencias significativas (figura 5, pág. 24).

En cuanto al fósforo (P) también se encontró un mayor contenido en los suelos donde se había aplicado lodo (27, 30), existiendo diferencias significativas para los tratamientos (ST50), (ST100) y (CP100) (figura 6, pág. 25).

El contenido de K asimilable en los suelos varió con el tipo de enmienda orgánica agregada (figura 7, pág. 25), siendo su disponibilidad elevada para las plantas ya que es posible encontrar una gran disponibilidad de forma inorgánica muy soluble (10).

En la figura 8 (pág. 26) se muestra la evolución de las fracciones asimilables de Mg, Ca y Na.

La aplicación de lodos provocó un incremento en el contenido de Ca en el suelo poco significativo, un leve decaimiento del Mg y condiciones fluctuantes para el Na con posibles lavados en el perfil a lo largo del ciclo (10).

En cuanto al contenido en micronutrientes Cu, Zn y Ni y metales pesados Cr, Cd y Pb, se comprobó que la aplicación de lodos aumentó los contenidos en el suelo de estos elementos respecto del testigo.

El suelo con lodo secado térmicamente (ST50) obtuvo la mayor concentración de Cu ($172,50 \text{ mgKg}^{-1}$), Ni ($17,95 \text{ mgKg}^{-1}$), Cd ($3,00 \text{ mgKg}^{-1}$) y Pb ($117,00 \text{ mgKg}^{-1}$) y el compost de lodo (CP100) obtuvo la mayor concentración de Zn ($365,35 \text{ mgKg}^{-1}$) y Cr ($59,33 \text{ mgKg}^{-1}$) (1). Sin embargo, en ningún caso superan las concentraciones de metales pesados en suelos con $\text{pH} > 7$, establecido en el RD 1310/1990 (4) que regula la utilización de lodos de depuradora en sistemas agrarios.

Finalmente, se obtuvo resultados de las propiedades físicas de los suelos en el cultivo de camelina estudiando: la evolución de la porosidad (figura 9, pág. 27) capacidad de campo y punto de marchitamiento (figura 10, pág. 27-28).

Como se puede observar en estas figuras, los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitamiento sufren un ligero aumento con la incorporación de lodo de depuradora al suelo, tanto secado térmico como compostado con resto de poda en el muestro al final de la cosecha (11).

Sin embargo, también en dicho muestreo, la porosidad del suelo desciende más pronunciadamente en el lodo secado térmico debido probablemente a un aumento de la compactación en los microporos (28).

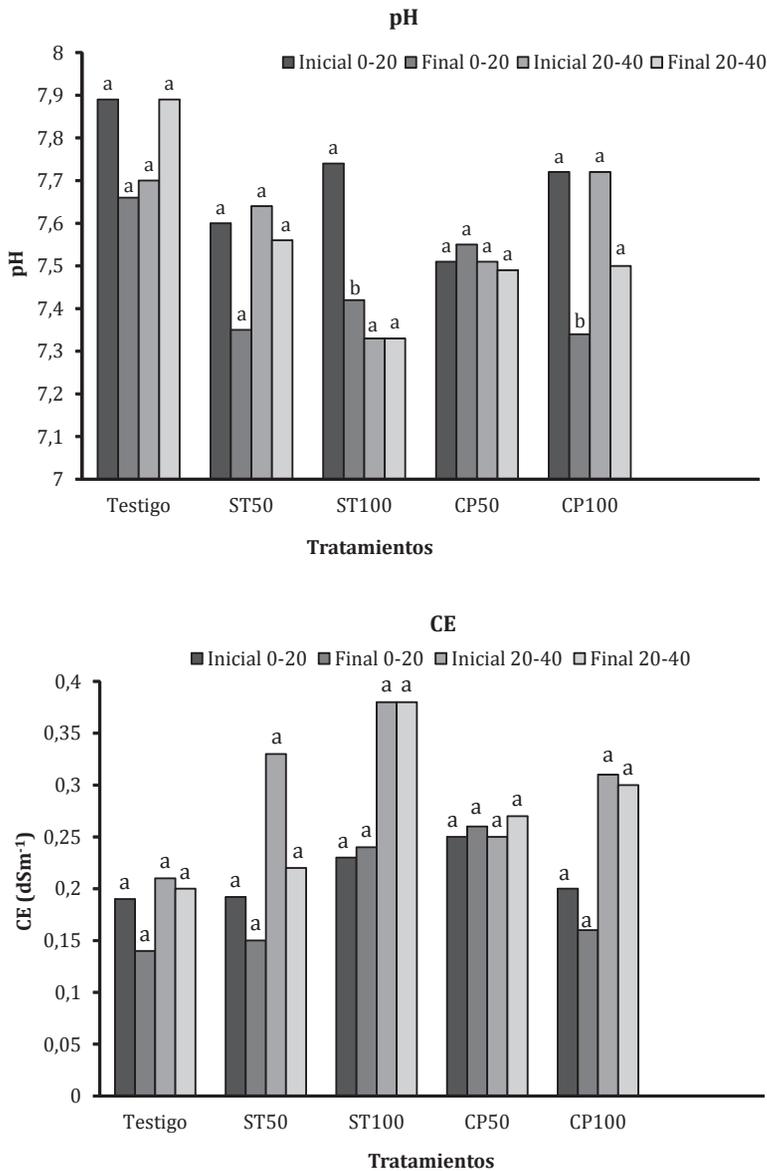


Figura 2. pH y la CE en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 2. pH and EC of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

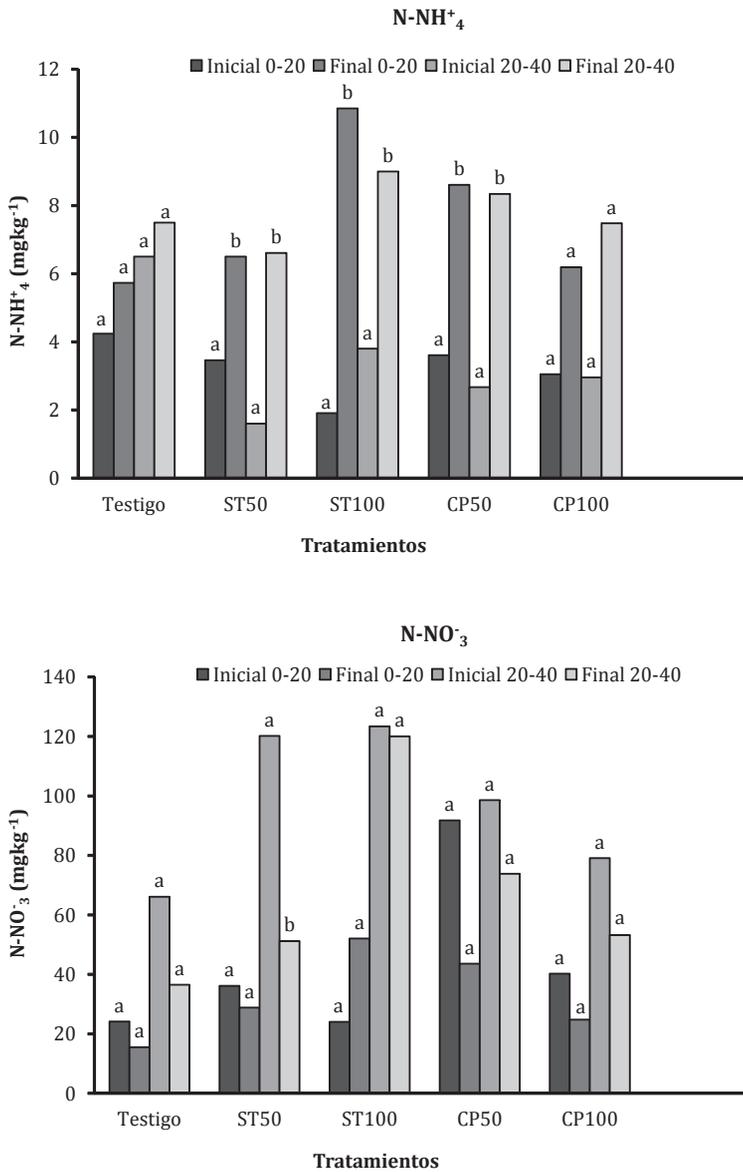


Figura 3. NH₄⁺-N y NO₃⁻-N en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 3. NH₄⁺-N and NO₃⁻-N of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

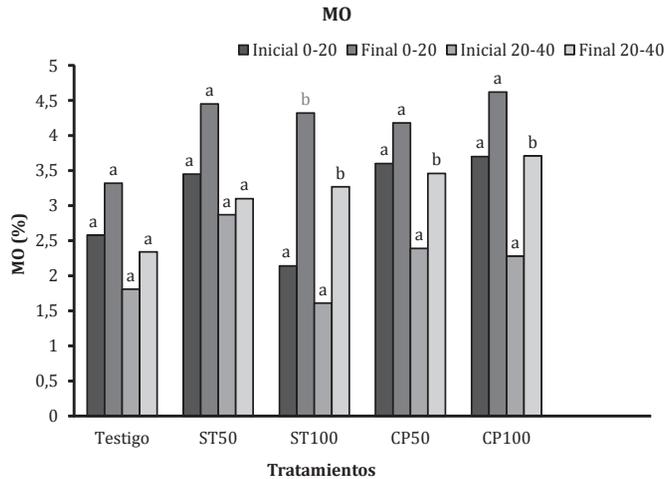


Figura 4. Materia orgánica (MO) en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40cm).

Figure 4. Organic matter of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

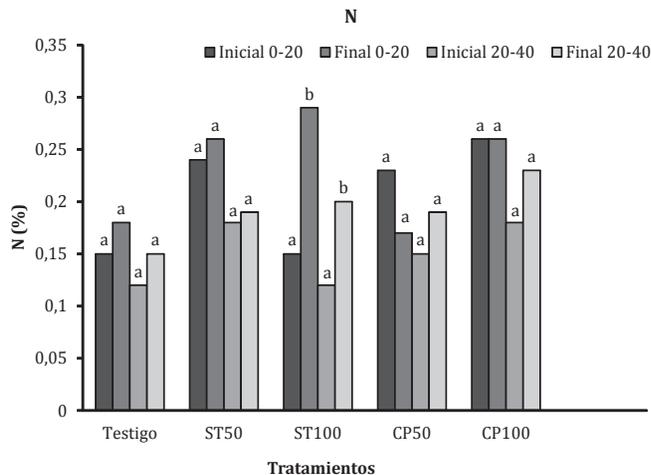


Figura 5. N en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 5. N of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

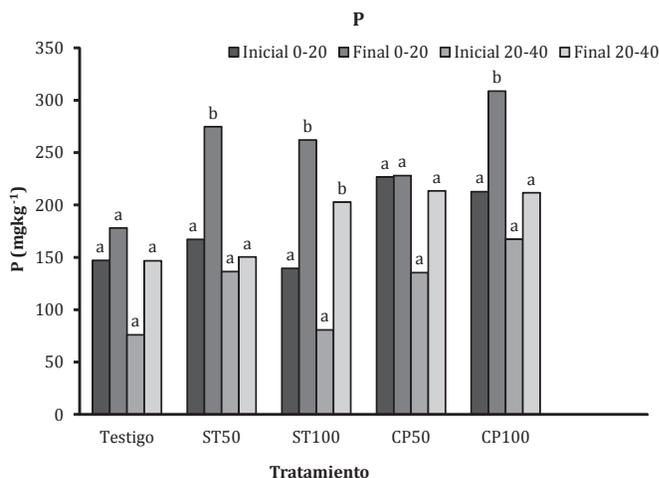


Figura 6. P en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 6. P of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

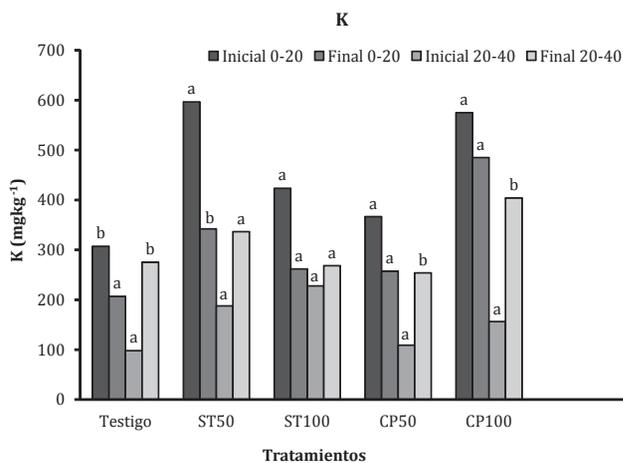


Figura 7. K en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes; tratamientos testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 7. K of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

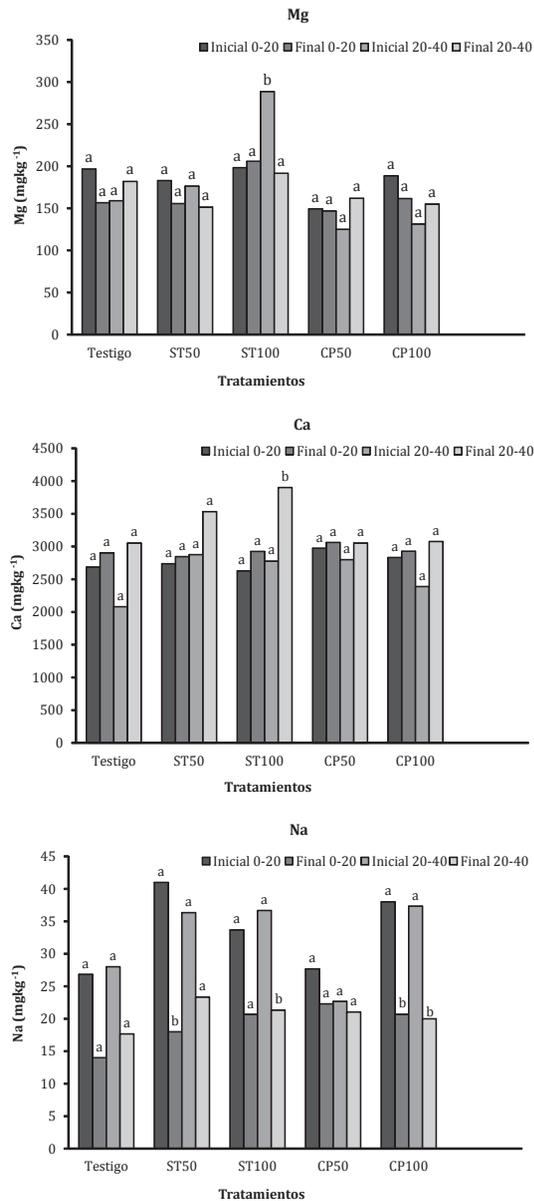


Figura 8. Mg, Ca, y Na en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm).

Figure 8. Mg, Ca and Na of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) and two depths (0-20 cm and 20-40 cm).

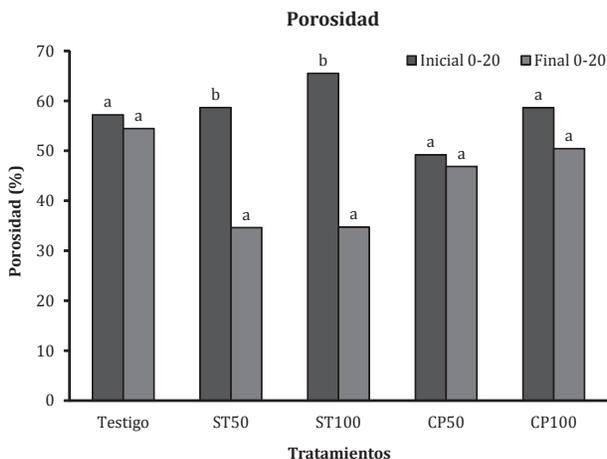


Figura 9. Porosidad en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y una profundidad (0-20 cm).

Figure 9. Porosity of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) at a depth of 0-20 cm.

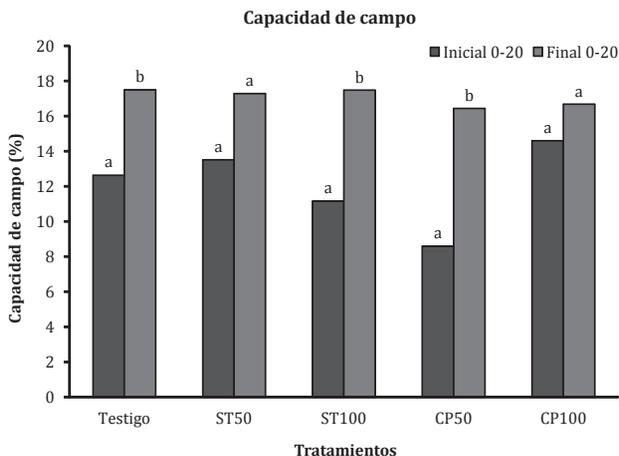


Figura 10. Capacidad de campo y punto de marchitamiento en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y una profundidad (0-20 cm).

Figure 10. Field capacity and wilting point of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) at a depth of 0-20 cm.

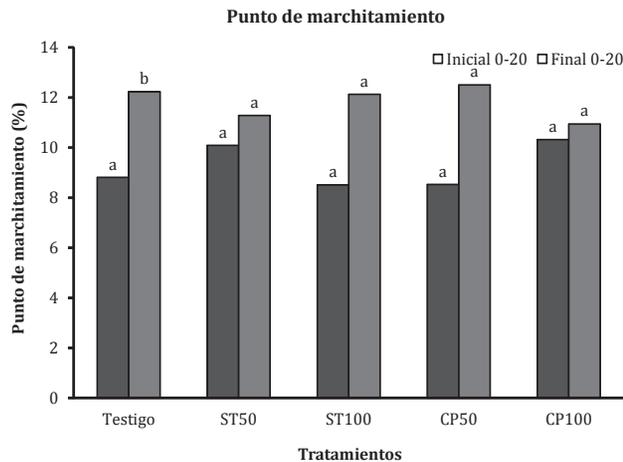


Figura 10 (cont.). Capacidad de campo y punto de marchitamiento en el suelo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) con diferentes tratamientos; testigo, lodo secado térmicamente (ST50 y ST100), compost de lodo (CP50 y CP100) y una profundidad (0-20 cm).

Figure 10 (cont.). Field capacity and wilting point of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) soil with different treatments; thermally-dried sewage sludge (ST50 y ST100), composted sewage sludge (CP50 y CP100) at a depth of 0-20 cm.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten comprobar el efecto residual de dos lodos de depuradora procedentes de un ensayo de fitorremediación con cardo en el cultivo de camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz). También este ensayo con camelina reflejó que es una planta que aprovecha bien la fertilización residual del cultivo anterior, por lo que podría ser considerada en una rotación de cultivos, aprovechando la fertilización remanente sin tener que aportar un nuevo abono al suelo.

Con el lodo secado térmicamente (ST50) se ha obtenido una mejor respuesta del cultivo, aumentando los valores de producción respecto del control y la fertilización con lodo compostado con resto de poda. También con el lodo secado

térmicamente (ST50) se vislumbra un aprovechamiento más eficaz del nitrógeno aplicado (proteína) y un mayor contenido en grasa.

En cuanto a la evolución de las propiedades físico-químicas del suelo se observó que la aplicación de lodo provocó un descenso del pH del suelo frente al testigo, al contrario del efecto en la CE que lo hizo aumentar. El $N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$ en el suelo de camelina aumentó con la incorporación de lodo de depuradora siendo el lodo secado térmico (ST100) el que adquirió mayor proporción.

Respecto del contenido de la materia orgánica en el suelo y evolución de los nutrientes N, P, K Ca, Mg y Na, en la mayoría de ellos el máximo contenido se encuentra en el suelo donde se ha aplicado

la dosis más alta de lodo secado térmico (ST100), excepto el K, Na. Finalmente, el contenido en micronutrientes Cu, Zn y Ni y metales pesados Cr, Cd y Pb en el suelo, se comprobó que la aplicación de lodos aumentó los contenidos en el suelo de estos elementos respecto del testigo, no superando en ningún caso las concentraciones de metales pesados en suelos con $\text{pH} > 7$, establecido en el RD 1310/1990 (4), el cual regula la utilización de lodos de depuradora en sistemas agrarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alcalá-Jáuregui, J. A.; Rodríguez Ortiz, J. C.; Hernández Montoya, A.; Villarreal-Guerrero, F.; Cabrera Rodríguez, A.; Beltrán Morales, F. A.; Díaz Flores, P. E. 2014. Heavy metal contamination in sediments of a riparian area in San Luis Potosi, Mexico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(2): 203-221.
2. APHA; AWWA; WPCF. 2005. *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater.* 21st ed. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington. 874 p.
3. Bautista-Cruz, A.; Cruz Domínguez, G.; Rodríguez Mendoza, M. de las N.; Pérez Pacheco, R.; Robles, C. 2014. Effect of compost and slow-release fertilizers addition on soil biochemistry and yield of maize (*Zea mays* L.) in Oaxaca, Mexico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(1): 181-193.
4. BOE. 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por lo que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
5. BOE. 2013a. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado.* 142: 44966-44973.
6. BOE. 2013b. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado.* 164: 51119-51207.
7. Bremner, J. M. 1982. Nitrogen-Total. In. A.1. Page et al. (ed). *Methods of soil analysis.* Agronomy. 9(2): 595-624.
8. Delgado, M.; Miralles de Imperial, R.; Porcel, M.; Bigeriego, M. 1999. Mineralización del nitrógeno procedente de residuos orgánicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental.* 15: 19-25.
9. Delgado, M.; Martín, J. V.; Miralles de Imperial, R. 2012. Evaluación de un lodo secado térmicamente en la fertilización de cultivo de cereal. *ITEA.* 106(1): 53-65.
10. Delgado, M.; Miralles de Imperial, R.; Rodríguez, C.; Martín, J. V. 2013. Influencia de la fertilización con lodo secado térmicamente en las propiedades químicas del suelo de tres cultivos de cereal. *ITEA.* 109(1): 1-15.
11. Di Ciocco, C. A.; Sandler, R. V.; Falco, L. B.; Coviella, C. E. 2014. Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico- químicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(1): 73-85.
12. Fernández, J. M.; Senesi, N.; Plaza, C.; Brunetti, G.; Polo, A. 2009. Effects of composted and thermally-dried sewage sludges on soil and soil humic acid properties. *Pedosphere.* 19: 281-291.
13. Gesch, R. W.; Cermak, S. C. 2011. Sowing date and tillage effects on fall-seeded Camelina in the northern Corn Belt. *Agronomy Journal.* 103(4): 980-987.
14. Gugel R. K.; Falk K. C. 2006. Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Can. J. Plant. Sci.* 86: 1047-1058.
15. Gutiérrez, M.; Albalat, A. 2013. El cultivo de la camelina en Aragón. *Tierras Agricultura.* 208: 72-79.
16. Hernández, D. 2006. Utilización del purín de cerdo con enmienda orgánica en suelos degradados: valorización agronómica y ambiental. Tesis Doctoral. Madrid. 257 p.

17. Hesse, P. R. 1971. Total nitrogen: the Kjeldahl Process. A Textbook of soil chemical analysis. Murray, Gran Bretaña. 520 p.
18. Horn, P.; Silva, J.; Anderson, D.; Fuchs, J.; Borisjuk, L.; Nazarenus, T.; Shulaev, V.; Cahoon, E.; Chapman, K. 2013. Imaging heterogeneity of membrane and storage lipids in transgenic *Camelina sativa* seeds with altered fatty acid profiles. The Plant Journal. 76: 138-150.
19. Imbrea, F.; Jurcoane S.; Hălmăjan H. V.; Duda, M.; Botos, L. 2011. *Camelina sativa*: A new source of vegetal oils. Rom. Biotech. Lett. 16: 6263-6270.
20. Johnson, J. M. F.; Gesch, R. W. 2013 Calendula and camelina response to nitrogen fertility. Ind. Crop. Prod. 43: 684-691.
21. MAPA. 1994. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Métodos Oficiales de Análisis. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. Tomo III. 662 p.
22. Martinelli, T.; Galasso, I. 2011. Phenological growth stages of *Camelina sativa* according to the extended BBCH scale. Anna. Appl. Biol. 158: 87-94.
23. Miralles de Imperial, R.; Martín, J. V.; Lobo, M. C.; Plaza, A., Delgado, M. M. 2011. Aplicación de dosis altas de lodo de depuradora a cultivo de girasol, efectos en planta y suelo. Revista Tierras Agricultura. 184: 74-79.
24. Miralles de Imperial, R.; Martín, J. V.; Lobo, M. C.; Plaza, A., Delgado, M. M. 2012. Comparación de fertilización mineral *versus* lodos de depuradora en cultivo de colza. Efectos en crecimiento y producción. Revista Tierras Agricultura. 196: 76-83.
25. Miralles de Imperial, R.; Martín, J. V.; Lobo, M. C.; Plaza, A., Delgado, M. M. 2014. Cultivo de cardo fertilizado con lodo de depuradora. Efectos en biomasa y suelos. Revista Tierras Agricultura. 215: 134-139.
26. Molina, J. L. 1989. La cebada. Morfología, fisiología, genética, agronomía y usos industriales, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 321 p.
27. Mosquera-Losada, M. R.; Muñoz-Ferreiro, N.; Riquero L., Rodríguez, A. 2010. Agronomic characterization of different types of sewage sludge: Policy implications. Waste Management. 30: 492-503.
28. Peñarete, W.; Silva, J.; Urriatia, N. 2013. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. Acta Agronómica. 62(3): 251-260.
29. SAS. Institute Inc. 1999. User's guide. Cary, North, Carolina, 891-996.
30. Saucedo Castillo, O.; de Mello Prado, R.; Castellanos González, L.; Ely, N.; Silva Campos, C. N.; Pereira Da Silva, G.; Assis, L. C. 2015. Efecto de la fertilización fosfatada con cachaza sobre la actividad microbiana del suelo y la absorción de fósforo en caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(1): 33-42.
31. Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. Natural Resources Conservation Service, U. S. Department of Agriculture Handbook. 436 p.
32. USEPA. 2007. Method 3051 A. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. US Gov. Print Office. Washington.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó gracias al proyecto FP12-RES y S2009/AMB-1478
(Consejería de Educación, Comunidad de Madrid).

Los autores agradecen a la empresa Camelina Company España S. L. por proporcionarnos las semillas para trabajar y a las personas Jesús García, María Isabel González y Ángela García por su colaboración en las tareas de campo y laboratorio.