

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

APORTE DE FÓSFORO Y EFECTOS SOBRE EL SUELO DE LODOS  
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA CELULÓSICA

por

María Verónica CUADRO CURBELO

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para la obtención del  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2019

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. PhD. Amabelia del Pino

-----

Ing. Agr. PhD. Jorge Hernández

-----

Ing Agr. MSc. Alejandro González

-----

Lic. Gimena Arrarte

Fecha : 12 de abril de 2019

Autora: -----

María Verónica Cuadro

### AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Amabelia del Pino, directora de este trabajo, por su incansable apoyo y todo el conocimiento que me compartió desde mi primer año de formación hasta la finalización de este trabajo.

También, al grupo disciplinario de Fertilidad de Suelos; muy especialmente a Jorge Hernández, Valeria Cejas, Viviana Falcón, Gimena Arrarte y Virginia Takata. Éstas personas me brindaron toda la ayuda que necesité durante la parte experimental de la tesis y sin ellos, todo se hubiese hecho cuesta arriba.

A la Facultad de Agronomía y a la empresa UPM por la posibilidad de realizar esta investigación.

Por último, a mis padres por acompañarme y ser mi sostén en toda la trayectoria de mi carrera y vida.

A todos ellos, vaya un saludo y un enorme gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ENMIENDAS ORGÁNICAS	3
2.2 EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE ENMIENDAS ORGÁNICAS .....	4
2.3 LODOS DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA.....	5
2.4 SUELOS DE PRIORIDAD FORESTAL EN URUGUAY – UNIDAD ALGORTA .....	7
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	9
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO Y SUELO.....	9
3.2.1 <u>Análisis de lodo</u> .....	9
3.2.2 <u>Análisis de suelo</u> .....	9
3.3 TRATAMIENTOS .....	10
3.3.1 <u>Experimento en laboratorio</u> .....	11
3.3.2 <u>Experimento en invernáculo</u> .....	11
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	11
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	12
4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL UTILIZADO.....	12
4.2 EXPERIMENTO DE INCUBACIÓN .....	13
4.2.1 <u>Respiraciones microbianas</u> .....	13
4.2.2 <u>Propiedades del suelo</u> .....	15
4.3 EXPERIMENTO MACETERO DE INVERNÁCULO.....	19
4.3.1 <u>Producción y absorción de nutrientes por las plantas</u> .....	19
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	26

6.	<u>RESUMEN</u> .....	28
7.	<u>SUMMARY</u> .....	29
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	30
9.	<u>ANEXOS</u> .....	33

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Parámetros analíticos del horizonte A del suelo utilizado en el estudio .....	10
2. Dosis aplicadas de lodo y sus componentes calculadas a partir de las dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> preestablecidas.....	10
3. Caracterización del lodo.....	12
4. Propiedades químicas del suelo con agregado de lodo y fertilizante en distintas dosis con resultados promedio de los cuatro muestreos.....	15
5. Respuesta relativa del contenido de N y P y producción biomasa de un cultivo de sorgo expuesto a distintos tratamientos con lodo y fertilizante respecto a un testigo .....	25
Figura No.	
1. Distribución de suelos de prioridad forestal en Uruguay .....	7
2. Evolución de la tasa de respiración durante la incubación de un suelo con lodo deshidratado y fertilizante en diferentes dosis .....	13
3. Evolución del C-CO <sub>2</sub> respirado durante la incubación de un suelo con lodo deshidratado y fertilizante en diferentes dosis .....	14
4. Evolución del P disponible en el suelo en función a las cuatro dosis de P aplicadas con lodo y fertilizante.....	16
5. Evolución del P disponible determinado en los cuatro muestreos realizados para suelo testigo, con agregado de lodo y con agregado de fertilizante .....	17
6. Evolución del N mineral en el suelo en función de las dosis de N aplicadas con lodo y fertilizante.....	18
7. Evolución del N mineral determinado en los cuatro muestreos realizados para suelo testigo, con agregado de lodo y con agregado de fertilizante .....	19
8. Producción de biomasa total para cada tratamiento del experimento de invernáculo. Corte a los 50 días pos plantación de sorgo .....	20
9. Contenido de N en parte aérea y raíz de sorgo.....	21
10. Contenido de P en parte aérea y raíz de sorgo .....	22
11. Ajuste de funciones de respuesta de biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante.....	23

12. Ajuste de funciones de respuesta de contenido de N en la biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante.....23
13. Ajuste de funciones de respuesta de contenido de P en la biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante.....24

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir de la promulgación de la ley forestal en Uruguay en el año 1987 el sector forestal ha cobrado cada vez más importancia con una rápida expansión en el territorio. Si bien las políticas internas del país contribuyeron a este desarrollo, también ventajas comparativas que ofrece, especialmente con relación a sistemas ambientales y ubicación geográfica, permitieron que se pudiera implementar esta actividad constituyendo hoy en día uno de los rubros de mayor importancia económica y social del país.

Respecto a la etapa industrial forestal, uno de los puntos importantes a considerar es la generación de subproductos o residuos que generan preocupación por su destino. Debido a esto se pensó en la posibilidad de que sean reutilizados a través de su aplicación al suelo en nuevas plantaciones forestales, de esta manera, estarían contribuyendo a la sostenibilidad de la cadena foresto-industrial y productiva y permitiendo sustituir en parte el uso de recursos no renovables como los fertilizantes. Para esto, es necesaria la evaluación de la no afectación del medio ambiente de dichos productos. Es así que se ha venido estudiando el potencial aporte de nutrientes y materia orgánica de lodos provenientes del tratamiento de efluentes de la producción de celulosa al ser agregados al suelo, así como de otros efectos secundarios, sobre propiedades del suelo como la conductividad eléctrica y el pH.

De acuerdo a los lineamientos dados por la normativa medioambiental, el tratamiento de residuos debe extremar los cuidados para evitar el vertido de nutrientes a cursos de agua. La posibilidad de vertidos de aguas residuales con alto contenido de fósforo (P) es altamente peligroso para la calidad del recurso agua, por lo tanto se han hecho esfuerzos para realizar tratamientos de captura del P, previo al vertido. Es así que en este proceso se generan lodos con relativamente altos contenidos de P, que pueden ser fuente de este nutriente para nuevas plantaciones forestales u otro tipo de cultivos. No obstante, el propio tratamiento de captura de P podría ser negativo en cuanto a la disponibilidad de este nutriente para las plantas. Esto se debe a que, por las características de los productos utilizados para su remoción, podrían generarse de este proceso compuestos de baja solubilidad y alta capacidad de retención de P una vez aplicados al suelo. Por estas razones es imprescindible contar con datos de la reacción producida por estos lodos con los componentes del suelo, así como la eficiencia en su aporte de P para las plantas, lo cual a su vez determinará la dosificación en las plantaciones.

En el Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía se ha trabajado en temas relacionados con la producción forestal por más de 20 años, siendo la sostenibilidad de este sistema de producción uno de los principales puntos de preocupación y enfocándose sobre todo en las etapas de cultivo a campo y su efecto sobre el suelo, el agua, cambios en los ecosistemas y recomendaciones de fertilización.

El objetivo principal del presente trabajo fue evaluar la viabilidad de la inclusión de lodos de precipitación de P provenientes de la industria de la celulosa como fuente de

nutrientes para las plantas, especialmente en lo que refiere a su aporte de P. Como objetivos secundarios se plantearon la caracterización físico-química de la mezcla de lodos y la evaluación del aumento de la disponibilidad de nutrientes, en especial P, producido en el suelo por el agregado de diferentes dosis.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ENMIENDAS ORGÁNICAS

En lo que a enmiendas orgánicas refiere, el origen del material y las condiciones de almacenamiento son factores determinantes para la variabilidad de sus características (Barbazán et al., 2011). De esta manera, en caso de no tener información concreta de la caracterización química del material se podrían estar cometiendo errores en cálculos de dosis causando distintos problemas, entre ellos la eutrofización de aguas por exceso de P (Sharpley et al., 1998). Asimismo, en Uruguay existe escasa información sobre la composición química y/o física de materiales orgánicos posibles a aplicar al suelo (del Pino et al., 2008).

En general, materiales de este tipo poseen, además de variable, un bajo contenido de nutrientes. No obstante, teniendo en cuenta la frecuencia y dosis de aplicación, las cantidades de nutrientes aportadas al suelo pueden ser muy elevadas. Dentro de las características más comunmente analizadas, las de mayor utilidad para realizar un manejo eficiente de estos recursos son las determinaciones de contenido de humedad y concentración de nutrientes, en particular nitrógeno (N) y P (Barbazán et al., 2011).

Como anteriormente fue mencionado se ha verificado que los patrones de mineralización y aporte por parte de distintos materiales de origen orgánico difieren significativamente entre sí. Sin embargo, aumentos en la actividad biológica del suelo, medidos tanto en respiración como en contenido de carbono (C) y N de la biomasa microbiana del suelo, se dan a grandes rasgos por todos los materiales sin considerar su origen. Por el contrario, el uso fertilizantes nitrogenados no fomenta la actividad microbiana, si no que provoca una disminución del pH y aumento de salinidad que la restringen (del Pino et al., 2008).

En cuanto al N presente en estos compuestos, para lograr una absorción adecuada por parte de las plantas las formas orgánicas deben mineralizarse, proceso que se encuentra controlado por las características bioquímicas del material (Griffin y Honeycutt, 2000). Teniendo el material una relación C/N (carbono/nitrógeno) menor a 15 probablemente se favorezca la mineralización neta de N (Beauchamp y Paul, 1989). Mientras que si la relación es igual o mayor a 18 probablemente se favorezca la inmovilización neta (Calderón et al., 2004). Por otro lado, algunos autores más flexibles sugieren que habrá mineralización neta en materiales con relación C/N igual o menor a 25 (Trinsoutrot et al., 2000).

En contraposición, aunque basar la dosis de material a aplicar en el contenido de N y su tasa de mineralización permite mejorar el manejo, esta estimación puede ocasionar problemas en cuanto a la acumulación de P, ya que estos materiales por lo general presentan una baja relación N/P, causando problemas ya anteriormente mencionados. Por lo tanto se sugiere utilizar el contenido de P como referencia para estimar dosis de estos

materiales cuando existen preocupaciones de cualquier tipo en cuanto a la acumulación de este nutriente en los suelos. Eghball y Power (1999b) sugirieron, por lo tanto, usar el contenido de P como base para estimar las cantidades a aplicar de estos materiales cuando existe preocupación por acumulación de P en los suelos.

## 2.2 EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE ENMIENDAS ORGÁNICAS

Si se toman en cuenta las investigaciones previas en el tema materiales orgánicos y su aplicación a los suelos, indiscutiblemente el centro de investigación por excelencia es el estiércol. A su vez, está claro que encontrar líneas de investigación en exactamente el mismo material con el que se trabaja, en estos temas, es de muy difícil ocurrencia en especial si se considera que el lodo con el que se trabajó fue producido de una manera distinta a la tradicionalmente utilizada. Por lo tanto, en esta revisión se examinarán enmiendas orgánicas en general.

El estiércol, tanto de origen vacuno como de aves, recolectado en Uruguay (del Pino et al. 2008, Barbazán et al. 2011) y en Estados Unidos (Eghball y Power 1999a, Dao y Cavigelli 2003) tiene una relación N/P baja lo que, en este sentido, lo hace comparable al residuo de producción de celulosa con el cual se trabajó.

En cuanto a la relación C/N, esta es más variable, presentando diferencias importantes incluso entre estiércoles de distintos orígenes. Según Barbazán et al. (2011) las muestras de estiércol de aves presentaron relación C/N de 8,18; mientras que el estiércol vacuno presentó 34,38 de relación en promedio. Se concluye que, en este caso, se encuentran similitudes con el material estudiado únicamente en el caso de estiércol de aves.

Otros lodos estudiados como enmiendas en Uruguay son los lodos provenientes de la industria maltera. Estos presentan como características a destacar la baja concentración de sólidos totales y gran volumen de agua. Su pH es muy cercano a la neutralidad, tienen muy baja concentración de metales y concentraciones de macronutrientes muy variables con un alto contenido de N y P y baja relación C/N. A su vez, al agregarlo al suelo se percibió un incremento en la actividad de los microorganismos y un aumento en la mineralización neta de N (Casanova et al., 2013).

Paralelamente, considerando los residuos de la industria de celulosa existen diversos tipos: lodos primarios, lodos secundarios, lodos de cal, “dregs and grits”, entre otros. Los lodos primarios están constituidos básicamente por restos de madera y corteza mientras que los demás tienen en su composición otros componentes incorporados de la cadena de transformación de madera en pulpa de celulosa (del Pino y Hernández, 2013). El lodo utilizado en el presente trabajo no está ubicado exactamente en esta clasificación pero en cuanto a su caracterización, componentes y origen podría asemejarse en gran medida a estos, en especial al lodo secundario.

El pH de los materiales fue en general alcalino, lo que está de acuerdo con los datos de la bibliografía, tanto para lodos primarios y secundarios, así como principalmente para el lodo de cal y “dregs and grits” (Vettorazzo et al., 2001). Para estos últimos (lodo de cal y “dregs and grits”), su alcalinidad representa una limitación de uso, ya que tendría un efecto importante sobre el suelo, lo que implica un riesgo en suelos con vegetales ya instalados. No obstante, en la medida que no hagan aporte importante de sodio, estos materiales podrían considerarse como mejoradores de suelo por aumentar el pH de suelos naturalmente ácidos o que se han acidificado.

### 2.3 LODOS DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA

Como es sabido, la materia orgánica (MO) juega un rol muy importante en la conservación de los suelos dado el efecto benéfico que tiene sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Lodos provenientes de la industria de la pulpa de celulosa, contienen tanto materia orgánica como nutrientes, lo cual los hace útiles como mejoradores de suelos con baja MO y, a su vez, su incorporación a estos suelos genera rentabilidad a su productor, evitando gastos en almacenaje, tratamientos e incluso en fertilizantes artificiales (Ribeiro et al., 2010).

No obstante, el uso y aplicación de estos residuos se debe realizar respetando el código de buenas prácticas agrícolas y realizando un monitoreo de la zona a aplicar y la calidad de sus suelos, una correcta caracterización de los residuos a utilizar y también considerar cursos de agua u otros recursos naturales cercanos a las potenciales zonas de aplicación con el fin de evitar la contaminación de suelo, agua y polución. En países europeos, existen restricciones de dosis a aplicar de lodos provenientes de esta industria regidas por la Unión Europea, sobre todo en lo que refiere a su contenido de macro y micronutrientes y metales; estableciendo de esta forma un máximo permitido a aplicar anualmente (Ribeiro et al., 2010).

En cuanto a resultados de estudios previos (Ribeiro et al., 2010), al comparar lodos primarios y secundarios los valores de pH fueron 7,2 y 7,8 respectivamente, lo que los hacía especialmente adecuados para su aplicación a suelos ácidos. El lodo primario presentó contenidos de materia orgánica y materia seca superiores al lodo secundario 47 % (M.O.) y 25 % (M.S.) contra 11 % (MO) y 10 % (MS) respectivamente, esto estaría explicado por una menor mineralización del lodo primario respecto al secundario que atraviesa más procesos durante su generación. En referencia al contenido de metales pesados, el lodo primario también presentó contenidos mayores al lodo secundario, lo que podría estar explicado por una mayor adsorción a sólidos de sedimentación: cadmio (Cd) 1,40 mg kg<sup>-1</sup> contra 0,34 mg kg<sup>-1</sup>, cobre (Cu) 13,0 mg kg<sup>-1</sup> contra 2,8 mg kg<sup>-1</sup>, níquel (Ni) 10,50 mg kg<sup>-1</sup> contra 1,44 mg kg<sup>-1</sup>, plomo (Pb) 13,2 mg kg<sup>-1</sup> contra 1,1 mg kg<sup>-1</sup>, zinc (Zn) 83,0 mg kg<sup>-1</sup> contra 12,9 mg kg<sup>-1</sup>; cromo (Cr) 19,0 mg kg<sup>-1</sup> contra 1,9 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Por otro lado, las concentraciones de N y P fueron superiores en el lodo secundario con valores de N total 2560 mg kg<sup>-1</sup> y P 370 mg kg<sup>-1</sup> respecto a N total 38 mg kg<sup>-1</sup> y P 167 mg kg<sup>-1</sup> para el lodo primario. Es importante destacar que estos resultados

presentaron valores inferiores a los indicados por otros autores y además concluir que estos lodos son adecuados para la fertilización de suelos, especialmente el lodo secundario.

Según estudios similares llevados a cabo en Uruguay a cargo de del Pino y Hernández (2013), el contenido de MS para el lodo primario fue de 15,70 % y para el lodo secundario 12,68 % y densidades promedio de 0,15 g cm<sup>-3</sup> y 0,10 g cm<sup>-3</sup> respectivamente. El pH de los materiales fue alcalino para ambos con valores promedio de 7,5 para el lodo primario y 8,0 para el secundario. En referencia al contenido de nutrientes, nuevamente el lodo primario mostró tener una menor riqueza de macronutrientes respecto al secundario: 7,8 g kg<sup>-1</sup> vs 46,5 g kg<sup>-1</sup> de N en base seca promedio, y 0,9 g kg<sup>-1</sup> vs 8,6 g kg<sup>-1</sup> de P en base seca promedio. Por otra parte, el lodo secundario presentó un alto nivel de N mineral disponible rápidamente para las plantas tras su aplicación al suelo. El contenido de C orgánico de los lodos fue alto presentando mayor variabilidad en el lodo primario con una relación C/N de 45,2 y de 9,5 para el lodo secundario; de esto se concluye que tras su aplicación al suelo, el lodo primario promoverá inmovilización de N mineral presente en el suelo mientras que el lodo secundario promoverá la liberación neta de N.

En el estudio de del Pino y Hernández (2013) los niveles de algunos micronutrientes como hierro (Fe), Cu, Zn y Mn en términos generales no difirieron mucho a valores presentados por Barbazán et al. (2011) para materiales como estiércol de ave y otras enmiendas ampliamente difundidas en Uruguay. Los contenidos de Cu y Zn fueron relativamente bajos, por otro lado, se destaca el alto contenido de Mn en el lodo secundario; estos tres micronutrientes, si se encuentran en concentraciones excesivas, pueden ser tóxicos y potenciales contaminantes. Para los metales pesados analizados en este estudio (Cd, Cr y Pb) el que estuvo en mayor concentración fue el Cr especialmente en el lodo primario. En tanto los otros metales se encontraron solamente en muy pequeñas cantidades en el lodo secundario.

Respecto a la liberación de nutrientes al suelo, en lo que refiere a la acumulación de N en suelo, esta depende en gran medida de la absorción por parte de las plantas y también de la dosis aplicada, forma de aplicación, etc. En líneas generales, 10-50% del N orgánico se vuelve disponible en el primer año desde la aplicación y 5-20% a partir del segundo año, menores cantidades quedarían disponibles en los siguientes años (Ribeiro et al., 2010). Cuando se compara el lodo primario y secundario, estos se comportan de forma opuesta ya que el lodo primario con baja concentración de N promueve inmovilización de N mineral del suelo y el lodo secundario con alta concentración de N promueve un aumento en el contenido de N mineral en el suelo (del Pino y Hernández, 2013). Como se mencionó, en este caso también puede usarse la relación C/N como guía para conocer el efecto de liberación o inmovilización de N.

En cuanto al P que se encuentra en el suelo, en su gran mayoría está en formas minerales que tienden a ser retenidas formando coloides o fosfatos con baja solubilidad.

Según Ribeiro et al. (2010) el uso de lodos de celulosa estaría mejorando el contenido de fósforo asimilable en el suelo. Sin embargo, otros estudios demostraron que el lodo secundario produjo efecto en el contenido de P asimilable pero no inmediatamente y el lodo primario no presentó resultados que defirieran del testigo sin aplicación (del Pino y Hernández, 2013).

En el trabajo de del Pino y Hernández (2013), tras agregarse al suelo el lodo primario generó aumentos significativos en el pH y el secundario no. Ambos materiales provocaron aumentos en la conductividad eléctrica (CE) del suelo cuando fueron agregados en dosis altas, aunque siempre por debajo de lo considerado riesgoso. El aumento de la CE está directamente relacionado a la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) y por consiguiente al aumento del N mineral. En referencia a las bases intercambiables del suelo, para ambos tipos de lodos el contenido de calcio (Ca) intercambiable de los suelos estaba linealmente relacionado con la dosis aplicada, y en cuanto a potasio (K) y sodio (Na) intercambiables, únicamente el lodo primario provocó aumentos significativos. Lo mismo sucedió con la evolución de la respiración microbiana donde el lodo primario fue el que mostró un efecto positivo con tasas de evolución de CO<sub>2</sub> siempre mayores al testigo, probablemente explicado por su alto aporte de C orgánico rápidamente disponible para los microorganismos del suelo.

#### 2.4 SUELOS DE PRIORIDAD FORESTAL EN URUGUAY – UNIDAD ALGORTA

Actualmente en Uruguay existen 4,3 millones de hectáreas de suelos de prioridad forestal distribuidas en 9 zonas CONEAT (MGAP. OPYPA, 2016).

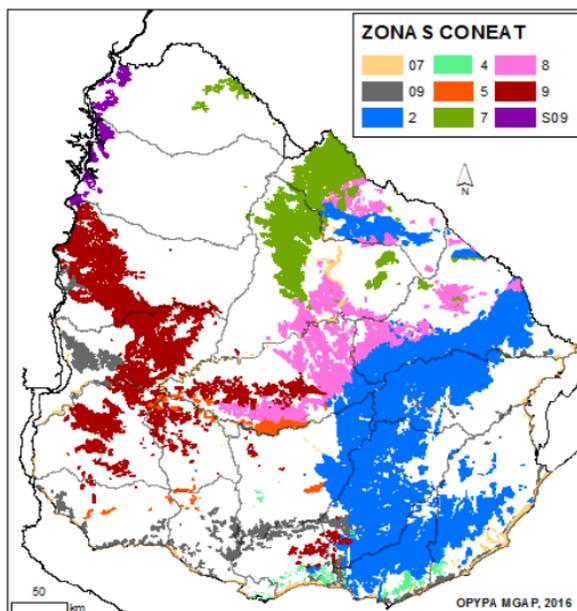


Figura No. 1. Distribución de suelos de prioridad forestal en Uruguay

Si bien todas estas zonas presentan incentivos similares para la producción forestal, el uso varía mucho entre ellas. Esto se puede explicar por diversos factores y uno de especial importancia es el potencial productivo de cada zona para esta actividad. Los suelos del grupo 7 lideran el ranking de productividad, seguidos por los suelos de los grupos 07 y 09, luego con una productividad media se encuentran los suelos de los grupos 8 y 9, seguidos por los grupos 2; 4 y 5 de baja productividad y por último se encuentra el grupo S09 con una productividad muy baja (MGAP. OPYPA, 2016).

La asociación de suelos de la unidad Algorta ocupa aproximadamente 135.000 hectáreas (0,8 % del territorio) y abarca los departamentos de Rio Negro y Paysandú. El uso de la tierra es predominantemente ganadero, teniendo importancia la agricultura en años anteriores (producción de remolacha azucarera). La forestación cobra importancia en la zona, teniendo en cuenta que los suelos presentes pertenecen al grupo CONEAT 9.3 mayoritariamente y en menor proporción a los grupos 9.6; 9.41; 9.42; 9.1; 9.7; 9.9; siendo casi todos de prioridad forestal (Califra et al., 2007).

De acuerdo a la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DSA, 1976) los suelos pertenecen principalmente al orden Saturados Lixiviados, en menor medida Melánicos y menos frecuentemente aún Poco desarrollados.

Respecto a los Argisoles de la unidad, el horizonte A promedio que presentan es de textura liviana y espesor mediano con buena diferenciación textural en el perfil. Se ubican en laderas altas, interfluvios aplanados y frecuentemente en concavidades. El gran espesor de su horizonte eluvial permite inferir que su saturación no es rápida, pero tampoco son eficientes en evacuar excesos. En suelos de esta clasificación, se evidencian manifestaciones de hidromorfismo temporario en forma de segregaciones de Fe y Mn, indicativas de su lenta permeabilidad condicionada por la baja conductividad hidráulica del horizonte Bt (Califra et al., 2007). Según Durán (1997) se incluyen en el Grupo hidrológico C. Según la definición de Series propuesta por Califra et al. (2007) los Argisoles de esta unidad estarían incluidos en la serie II “Quebracho”.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron experimentos en condiciones controladas de laboratorio e invernáculo, donde se aplicaron idénticos tratamientos en ambos experimentos. El estudio se hizo en un suelo de prioridad forestal representativo de los suelos bajo plantaciones de Eucalipto del litoral (Argisol de la unidad Algorta).

#### 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO Y SUELO

##### 3.2.1 Análisis de lodo

Para la caracterización del lodo utilizado (mezcla de lodos deshidratados proveniente de la Planta de celulosa de UPM-Fray Bentos) para el presente estudio se analizó: contenido de materia seca por gravimetría, densidad, pH y CE, así como contenido total de sólidos volátiles, C, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn.

El contenido de C total se determinó por oxidación con dicromato de K a 150 °C durante 30 minutos y determinación colorimétrica (Nelson y Sommers, 1996).

En una digestión de 0.5 g de muestra con ácido sulfúrico y catalizador, fueron determinados los contenidos totales de N, por el método de Kjeldahl (Bremmer y Mulvaney, 1982).

Posteriormente, en una dilución con ácido clorhídrico de las cenizas de 1 g de muestra (obtenidas por calentamiento en mufla a 500 °C), se determinaron los contenidos totales de P con el método colorimétrico del ácido ascórbico (Murphy y Riley, 1962).

En el mismo extracto usado para P los contenidos de Mg, Ca, Fe, Zn, Cu y Mn se determinaron por absorción atómica y el contenido de K total por espectrometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971).

##### 3.2.2 Análisis de suelo

El C orgánico fue determinado por titulación con sulfato ferroso, luego de atacar una muestra con dicromato de K y ácido sulfúrico, sin calor exterior según el método de Walkey-Black. El P disponible se analizó según el método Bray 1.

La extracción de Ca, Mg, K y Na se realizó con acetato de amonio 1 M buffereado a pH 7 y se determinó como ya fue explicado para lodo. En cada muestra también se midió pH en agua por potenciometría (relación suelo:agua 1:1).

Además se realizó monitoreo periódico de actividad biológica mediante determinación de la respiración microbiana (CO<sub>2</sub>) durante todo el experimento con un total de 8 mediciones. Se pesaron 50 g de suelo fresco mezclado con los materiales en vasos de 50 mL; colocándolos en frascos de 1 L cerrados herméticamente, con un recipiente conteniendo 5 mL de NaOH 0,25 M. Luego de cada período, se tituló el NaOH

con HCl 0,1 M (Anderson, 1982). Se calculó el C-CO<sub>2</sub> liberado por diferencia respecto al C-CO<sub>2</sub> atrapado en frascos control sin suelo. En cada medición se controló el contenido de humedad y se volvió a colocar un recipiente con NaOH 0,25 M en el frasco hermético para la medición siguiente.

Por otra parte, se caracterizaron previamente algunos parámetros físicos y químicos de importancia del suelo utilizado como lo son textura, pH, contenido de materia orgánica, P disponible y bases intercambiables.

Cuadro No. 1. Parámetros analíticos del horizonte A del suelo utilizado en el estudio

Suelo	Cationes intercambiables							
	pH (H <sub>2</sub> O)	MO	P Bray	Ca	Mg	K	Na	B.T.
		%	mg kg <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----				
Algorta	4.9	4.5	5	5.84	1.17	0.22	0.14	7.37

La textura del suelo se compone por un 9,2% de arcilla, 11,0% de limo y 79,8% de arena. Esto es lo esperable para un suelo arenoso de la unidad de suelos Algorta.

### 3.3 TRATAMIENTOS

Se trabajó con 9 tratamientos y 3 repeticiones de cada uno totalizando 27 unidades experimentales para cada experimento (laboratorio e invernáculo).

- Cuatro dosis de lodo, procurando abarcar un amplio rango de dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> equivalentes a nivel de campo: 50; 100; 150 y 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2).
- Cuatro dosis de fertilizante sintético soluble, fosfato de K y urea, que aseguraran las mismas cuatro dosis de P y N que el lodo.
- Un testigo sin agregado de lodo ni fertilizante.

Cuadro No. 2. Dosis aplicadas de lodo y sus componentes calculadas a partir de las dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> preestablecidas

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Lodo	C	N	P	K	Ca	Mg	Na
----- kg ha <sup>-1</sup> -----								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	2729	764	82	22	14	300	11	29
100	5459	1528	164	44	27	600	22	57
150	8188	2293	246	66	41	901	33	86
200	10917	3057	328	87	55	1201	44	115

### 3.3.1 Experimento en laboratorio

Se incubó el suelo con los distintos tratamientos, a temperatura y humedad controladas (25 °C y 90 % de capacidad de campo respectivamente). Para ello se extendió el suelo (700 g por bandeja) en una fina capa y se agregó el lodo y fertilizante (separadamente) mezclando cuidadosamente y llevando el contenido de agua del suelo a la humedad requerida.

Se realizaron muestreos periódicos de suelo en los días 7, 14, 30 y 90 de iniciado el experimento. Las muestras fueron secadas a estufa por 48 horas a 40 °C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm.

Se analizaron contenidos de P Bray 1, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N mineral, pH y actividad biológica siguiendo la metodología descripta.

### 3.3.2 Experimento en invernáculo

Se establecieron 27 macetas con el mismo suelo y los mismos tratamientos utilizados en el experimento de laboratorio (4,5 kg de suelo por maceta), haciendo crecer plantas de sorgo (gramínea). La mezcla de lodo y fertilizante con el suelo se realizó tal como fue explicado para el experimento de incubación. A su vez, se plantaron cinco plantas pre germinadas por maceta, las cuales fueron cuidadosamente monitoreados para luego realizar un raleo dejando tres plantas por maceta. El proceso de selección-raleo se realizó a los 17 días pos plantación.

Se realizó un único corte a los 90 días pos emergencia. Las muestras de plantas fueron secadas a 60 °C hasta peso constante y molidas hasta un tamaño menor a 0,5 mm.

En planta se determinó: rendimiento de MS en parte aérea y raíz y análisis del contenido total de N y P según los mismos métodos explicados para el lodo.

## 3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos presentados en los resultados de este trabajo corresponden al promedio de las tres repeticiones por tratamiento.

Se hizo análisis de varianza de los resultados de los diferentes parámetros analizados con un diseño totalmente aleatorizado. Se evaluó el efecto de los tratamientos mediante contrastes ortogonales, comparando los tratamientos con agregado de lodo o fertilizante con el testigo. También se buscó ajustar un modelo matemático (lineal, polinomial o exponencial) a la respuesta vegetal al P y N, ya sea procedente del lodo o del fertilizante. Este modelo podría usarse como base para la recomendación de dosis de lodo en condiciones de producción.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL UTILIZADO

Se presenta el Cuadro 3 con la caracterización química y física del lodo utilizado en el experimento. El material muestra un muy alto contenido de materia seca, lo cual indica que se trata de un lodo desecado. Esto es muy importante al momento de pensar en el transporte del lodo desde la Planta industrial al campo donde se estaría utilizando, haciéndolo más eficiente.

Cuadro No. 3. Caracterización del lodo

MS	CE	pH	Dens.	C	P	N	Ca	Mg	K	Na	Cu	Fe	Mn	Zn
%			Mg m <sup>-3</sup>	-----%-----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
95	2.4	8.0	0.35	28	0.80	3	11	0.4	0.5	1.05	13	4065	623	47

El pH del material resultó ser alcalino lo que permite recomendar su uso en suelos ácidos donde promoverá un aumento de pH y mejora de las condiciones del suelo en caso de usarse por períodos prolongados y/o altas dosis. Esto es una característica de materiales provenientes de procesos biológicos (Whalen et al., 2000).

En referencia al contenido de macronutrientes (N, P y K) en general este fue bajo, siendo N el macronutriente en mayor concentración (3 %). Teniendo en cuenta el contenido de N, el lodo utilizado sería comparable al estiércol que se encuentra en un rango de 1-4 % de contenido de N medido en base seca (del Pino et al. 2008, Barbazán et al. 2011). Además, el material tiene alto contenido de C (28 %) y relativamente bajo contenido de P (0,8 %), por ende en principio no sería importante la acumulación de P tras su agregado al suelo. La relación N/P del lodo fue relativamente baja (3,75) y la relación C/N de 9,33. Teniendo en cuenta esta última se promoverá la mineralización neta de N (Beauchamp y Paul 1989, Trinsoutrot et al. 2000) quedando disponible para su absorción por las plantas (Barbazán et al., 2011).

Respecto a micronutrientes es de destacar la elevada concentración de Mn y principalmente Fe. Entre las bases intercambiables Ca fue el catión mayoritario y Na se encontró en baja concentración.

La conductividad eléctrica fue de 2,4. Esto representa la concentración de sales solubles del material. Cantidades excesivas son perjudiciales para el suelo ya que interfieren negativamente en la agregación de los coloides.

Los resultados obtenidos reafirman la sugerencia realizada por Barbazán et al. (2011) de caracterizar químicamente el material antes de agregarlo al suelo debido a la

gran variabilidad de composición que hay dentro y entre los grupos de materiales orgánicos.

## 4.2 EXPERIMENTO DE INCUBACIÓN

### 4.2.1 Respiraciones microbianas

El proceso de respiración no es más que la oxidación de compuestos orgánicos a  $\text{CO}_2$  por parte de los microorganismos presentes en el suelo (Paul, 2007). La biomasa microbiana puede ser considerada como el principal agente de descomposición de la MOS, transformación de nutrientes y estabilización estructural del suelo (Brookes et al., 2008). Dicho esto, se puede asumir que la respiración microbiana es altamente dependiente e incluso indicativo de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el suelo.

En la Figura 2 se indica la evolución de la tasa de respiración durante la incubación de los diferentes tratamientos, y en la Figura 3 se indica la evolución acumulada del C- $\text{CO}_2$  producto de la respiración a lo largo del tiempo.

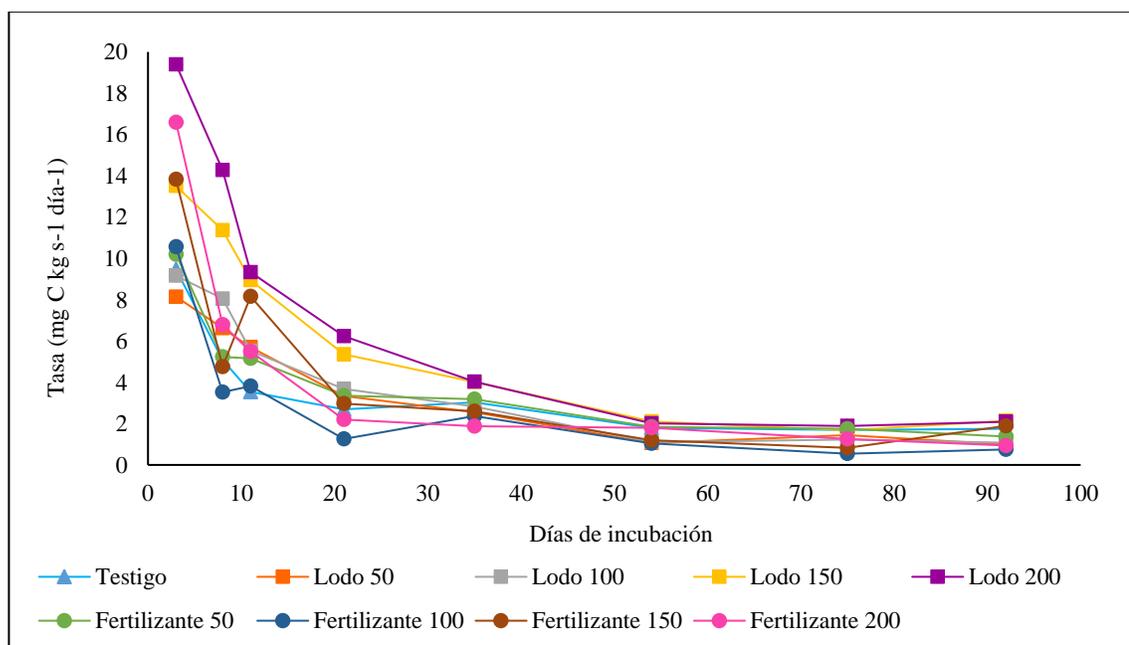


Figura No. 2. Evolución de la tasa de respiración durante la incubación de un suelo con lodo deshidratado y fertilizante en diferentes dosis

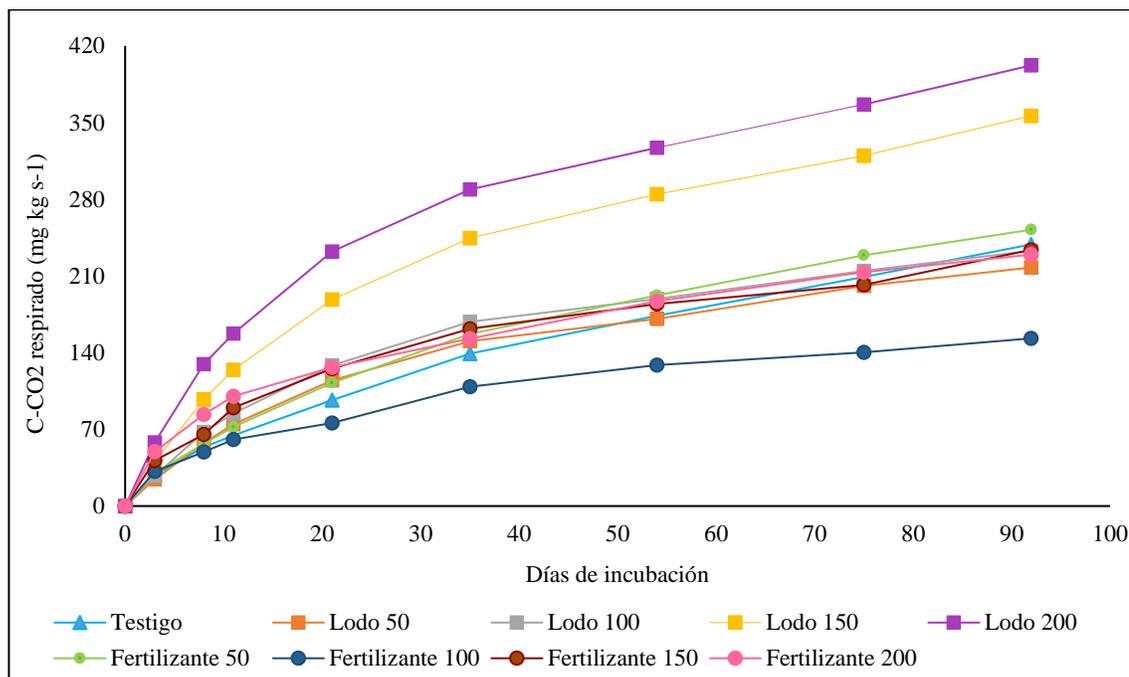


Figura No. 3. Evolución del C-CO<sub>2</sub> respirado durante la incubación de un suelo con lodo deshidratado y fertilizante en diferentes dosis

En la Figura 3 se puede observar que a medida que pasan los días aumentan las cantidades de C respirado con incrementos decrecientes (tasa decreciente) para todos los tratamientos. Se puede relacionar con lo observado en la Figura 2, las curvas de tasa de respiración para todos los tratamientos decrecen al pasar de los días. Las dosis de lodo 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y lodo 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> se destacaron respecto a los demás tratamientos en cuanto a la cantidad de C desprendido por respiración. La dosis Fertilizante 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> mostró la menor tasa de respiración.

De acuerdo al análisis estadístico hubo un efecto significativo de los tratamientos en la tasa de respiración hasta el día 37, no habiendo diferencias significativas de ahí en adelante. Además, este análisis demostró que el efecto de la variación entre las dosis de lodo en la tasa de respiración fue estadísticamente significativo y por otro lado, las distintas dosis de fertilizante no produjeron cambios significativos en la misma.

En función a lo anteriormente expuesto se puede inferir que el lodo utilizado en este experimento es de fácil descomposición debido al alto desprendimiento de C por respiración microbiana que presentan todas las dosis. Esto indica que se hacen disponibles sus compuestos en el suelo con rapidez, aumentando su utilidad como enmienda orgánica en nuevas plantaciones.

Por otro lado, aunque las dosis de lodo y fertilizante se hicieron comparables en su aporte de N y P en términos cuantitativos, en base a estos resultados se puede inferir

además que el aporte orgánico del lodo también mejorará el contenido de materia orgánica del suelo y, en consecuencia, su estabilidad estructural (Brookes et al., 2008).

#### 4.2.2 Propiedades del suelo

Se presentan valores promedio de los cuatro muestreos realizados para las propiedades químicas analizadas (Cuadro 4). Para las dos dosis más altas de fertilizante no se evaluó contenido de N mineral.

Cuadro No. 4. Propiedades químicas del suelo con agregado de lodo y fertilizante en distintas dosis con resultados promedio de los cuatro muestreos

	pH	P Bray 1	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N mineral (mg/kg)
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
Testigo	4,9	8,0	6,0	10,7	17,5
Lodo 50	5,0	9,6	10,7	15,5	26,2
Lodo 100	5,0	12,5	16,7	21,0	37,6
Lodo 150	5,1	12,3	18,2	27,8	46,0
Lodo 200	5,2	16,0	22,1	39,4	61,5
Fert. 50	5,0	13,8	18,6	30,1	48,7
Fert. 100	4,9	17,5	38,9	30,5	69,4
Fert. 150	5,0	24,2	ND	ND	ND
Fert. 200	5,0	29,7	ND	ND	ND

ND: No determinado

El pH del suelo para todos los tratamientos fue ácido, ubicándose en torno a 5, mientras que en los Cuadros 1 y 3 se observa que el pH del lodo es alcalino. Se esperaría que en los tratamientos con lodo el pH aumentara por el agregado de un material con un pH básico; hubo un aumento muy pequeño aunque significativo respecto al testigo y al fertilizante. Tal vez el reducido aumento podría explicarse por el poco tiempo que estuvo en contacto el suelo con el material durante los muestreos (3 meses) o también porque podrían no ser suficientes las dosis para producirse un cambio mayor.

En referencia al contenido de N mineral y P disponible, los tratamientos con lodo y fertilizante presentaron contenidos superiores al testigo y el contenido de estos nutrientes fue en aumento conjuntamente con las dosis. Los tratamientos con fertilizante presentaron aún mayores contenidos de N y P que las respectivas dosis de lodo. De acuerdo al análisis estadístico de contraste realizado para N mineral y P disponible existieron diferencias entre testigo, lodo y fertilizante y además entre las distintas dosis de estos materiales.

Para las Figuras 4, 5, 6 y 7 presentadas a continuación se deben hacer algunas aclaraciones pertinentes en cuanto al origen de sus datos. Los gráficos presentados en las Figuras 4 y 6 se hicieron promediando los datos obtenidos de los 4 muestreos para cada dosis. En la Figura 6 para el caso del fertilizante se muestran los resultados de las dos menores dosis ya que no se determinó el contenido de N mineral en las demás dosis. El gráfico de la Figura 5 se hizo promediando para cada material (lodo y fertilizante) las 4 dosis. El gráfico de la Figura 7 se hizo promediando únicamente las tres repeticiones de las dos menores dosis de lodo y fertilizante por lo anteriormente explicado y con la finalidad de hacer más justa la comparación; en cuanto al testigo se obtuvieron los datos de igual forma que para la Figura 5.

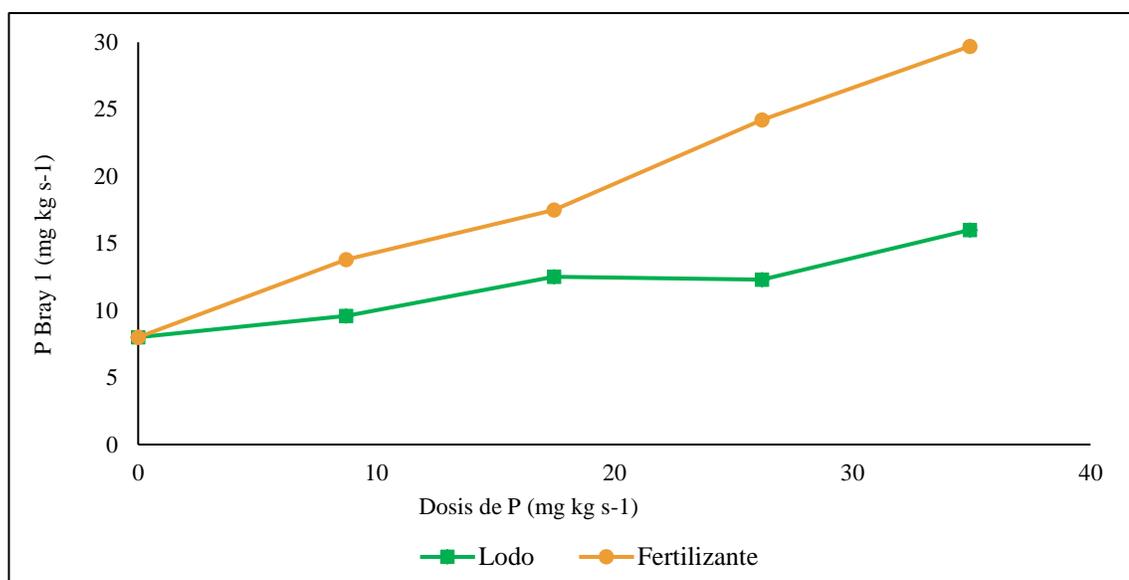


Figura No. 4. Evolución del P disponible en el suelo en función a las cuatro dosis de P aplicadas con lodo y fertilizante

En la Figura 4 se puede comparar el P disponible en suelo a medida que aumentan las dosis de los compuestos lodo y fertilizante agregadas. Los tratamientos con agregado de fertilizante superan a los con agregado de lodo para todas las dosis, haciendo mayor la diferencia cuanto mayor la dosis. Esto puede estar explicado por los compuestos que estaría formando el P en cada material, probablemente los del lodo sean compuestos de mayor estabilidad haciéndose menos disponible para las plantas. Los tratamientos que reciben estos lodos en la planta de celulosa pueden estar jugando algún papel en este sentido.

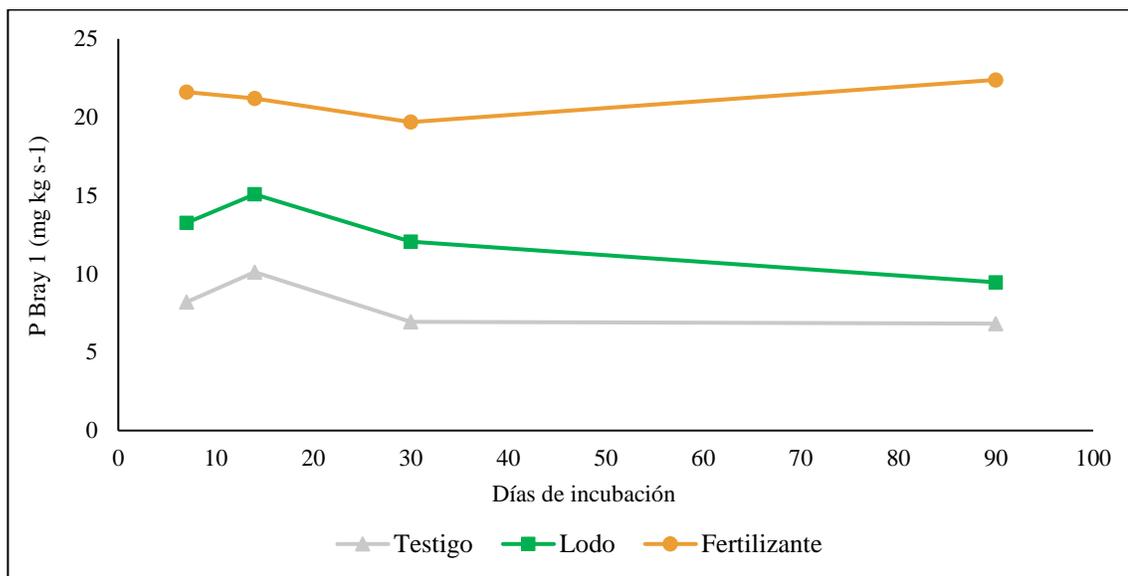


Figura No. 5. Evolución del P disponible determinado en los cuatro muestreos realizados para suelo testigo, con agregado de lodo y con agregado de fertilizante

En el caso de la Figura 5 se ve la evolución del P disponible en el suelo a medida que pasa el tiempo hasta los 90 días. Nuevamente se ve que el fertilizante alcanza niveles mayores en términos cuantitativos, pero se puede ver también como el máximo P disponible obtenido con cada material se alcanza a mayor velocidad en los tratamientos con lodo lo que podría estar en parte explicado por la facilidad de descomposición de este material.

Excepto para el fertilizante, las demás curvas se ajustan a lo que se conoce como la dinámica del P en los suelos y que implica que la evolución en el tiempo del P disponible proveniente del agregado como fertilizante y/o enmienda sea decreciente, debido a la retrogradación o fijación de P por parte del suelo.

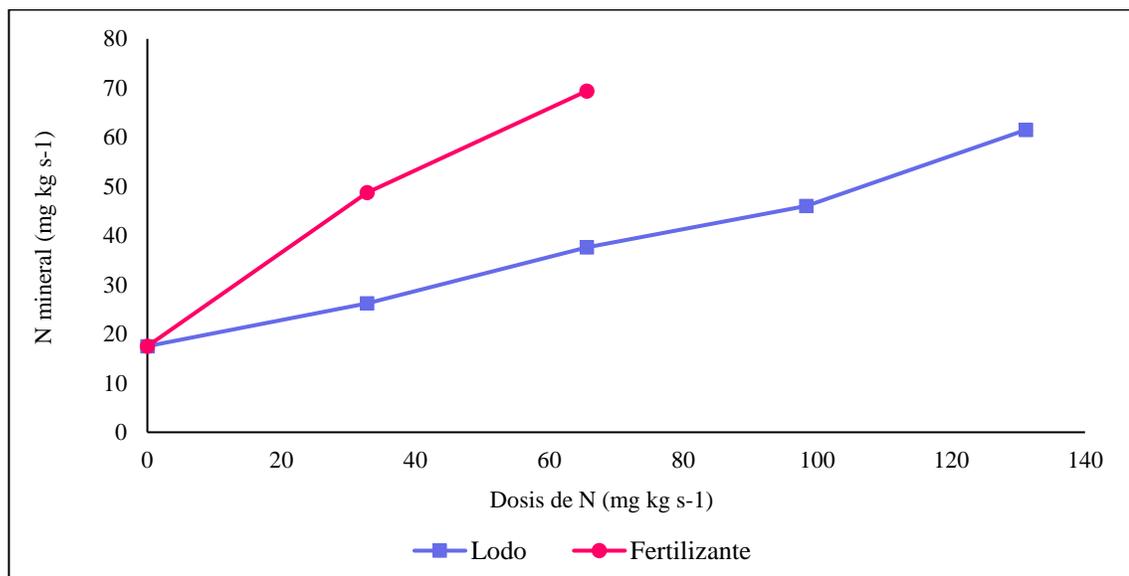


Figura No. 6. Evolución del N mineral en el suelo en función de las dosis de N aplicadas con lodo y fertilizante

En la Figura 6 se ve la tendencia en aumento de N mineral en el suelo a medida que aumentan las dosis de lodo y fertilizante agregadas. La tasa de respuesta de los tratamientos con fertilizante al aumentar las dosis es mucho mayor a la del lodo. Como las dosis de lodo y fertilizante aplicadas se hicieron comparables en términos de P y N es probable que esta diferencia nuevamente se deba a las características de los compuestos formados por N del lodo que probablemente esté en gran parte en formas orgánicas de lenta mineralización. De todos modos se destaca que con el lodo se obtuvieron altos valores de N mineral en suelo predominando el N como  $\text{NO}_3$  respecto al N como  $\text{NH}_4$  (Cuadro 4).

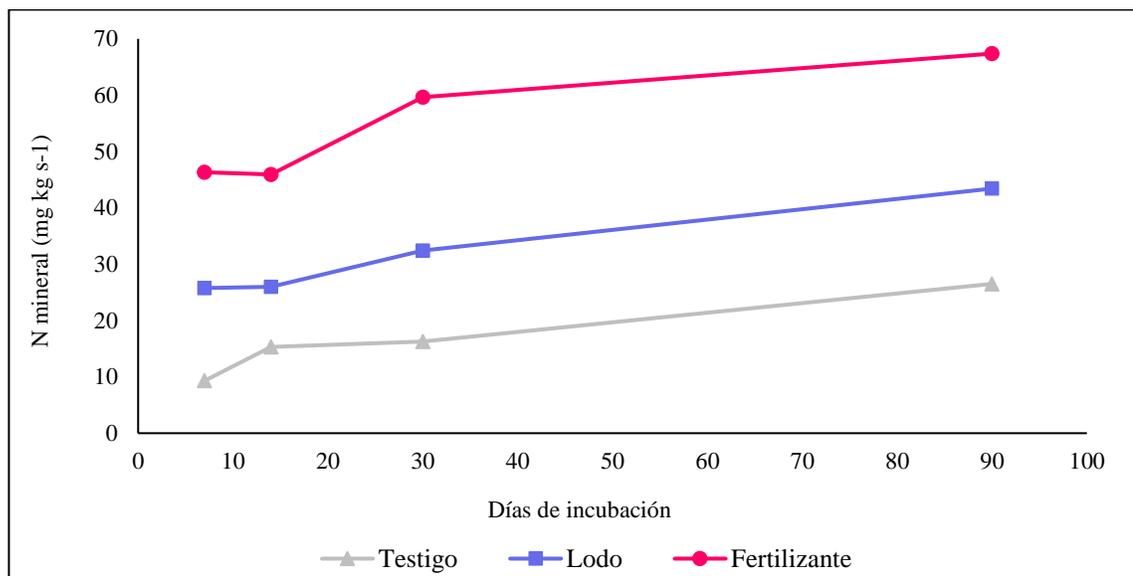


Figura No. 7. Evolución del N mineral determinado en los cuatro muestreos realizados para suelo testigo, con agregado de lodo y con agregado de fertilizante

En la Figura 7 se muestra la creciente evolución del N mineral en el suelo a medida que pasa el tiempo hasta los 90 días. Mientras el N del fertilizante estuvo disponible desde el principio y no es de esperarse cambios en el tiempo, los tratamientos con lodo continuaron aumentando el N mineral en suelo probablemente por mineralización de N orgánico presente en el material. En contraste con los datos presentados para P, en este caso las velocidades de incremento para lodo y fertilizante son muy similares. La brecha de N mineral entre tratamientos con lodo y con fertilizante para todos los muestreos permanece muy similar encontrándose en torno a los 20 mg kg s<sup>-1</sup>.

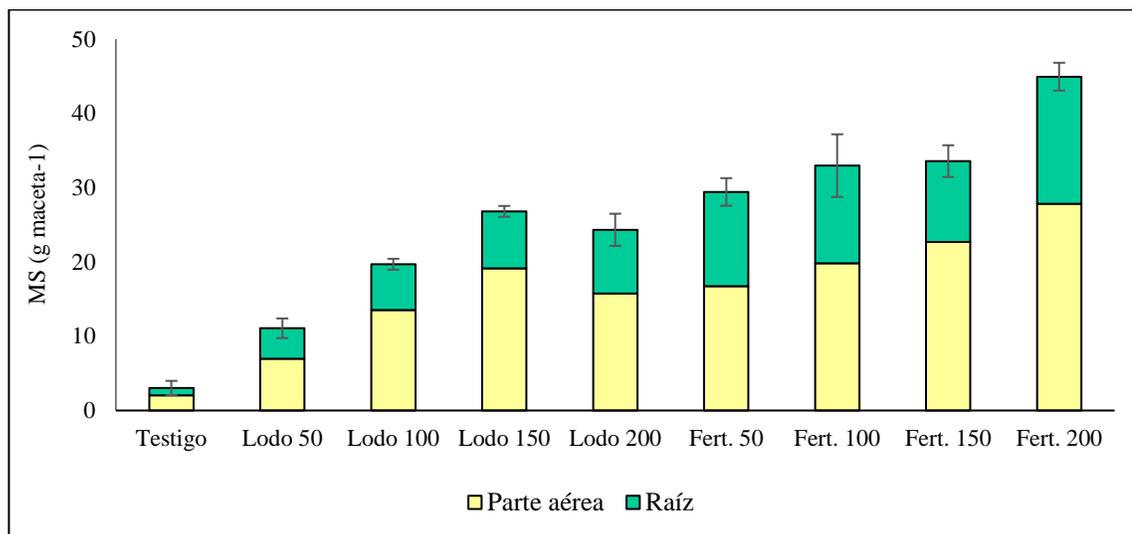
#### 4.3 EXPERIMENTO MACETERO DE INVERNÁCULO

##### 4.3.1 Producción y absorción de nutrientes por las plantas

En esta sección se presentan los resultados de biomasa total (aérea y radicular), contenido de N y contenido de P en las plantas correspondientes a los diferentes tratamientos.

Se aclara que las barras presentadas en los gráficos de las Figuras 8, 9 y 10 representan el desvío estándar de los resultados.

En la Figura 8 se observa una clara tendencia en aumento de la producción de biomasa total a medida que aumentan las dosis tanto de lodo como de fertilizante en comparación al testigo sin agregados.



Corte a los 50 días pos plantación de sorgo

Figura No. 8. Producción de biomasa total para cada tratamiento del experimento de invernáculo.

Sin embargo, en este análisis se pudo evidenciar que la dosis de Lodo 200 tuvo una leve disminución en la respuesta de biomasa respecto a la dosis Lodo 150. Si se observan las Figuras 9 y 10; para la absorción de N y P aparentemente no habría disminución en la dosis Lodo 200, por ende se puede pensar que esto podría estar explicado por algún otro factor presente en el lodo que pueda estar interfiriendo negativamente en el crecimiento de las plantas. Una vez más resalta la importancia de aportar el material en cantidades adecuadas y no excesivas.

La dispersión de los resultados obtenidos a partir de las tres repeticiones de cada tratamiento fue en general acotada, siendo la dosis Fertilizante 100 la que tuvo mayor variabilidad.

En la Figura 9 se observa la respuesta en contenido de N total en planta a medida que aumentan las dosis de lodo y fertilizante respecto al testigo. La tendencia en este caso también es creciente a medida que aumenta la cantidad lodo y fertilizante. Este aumento en la cantidad de N extraído por maceta, en este experimento, estuvo explicado principalmente por el aumento en la producción de biomasa.

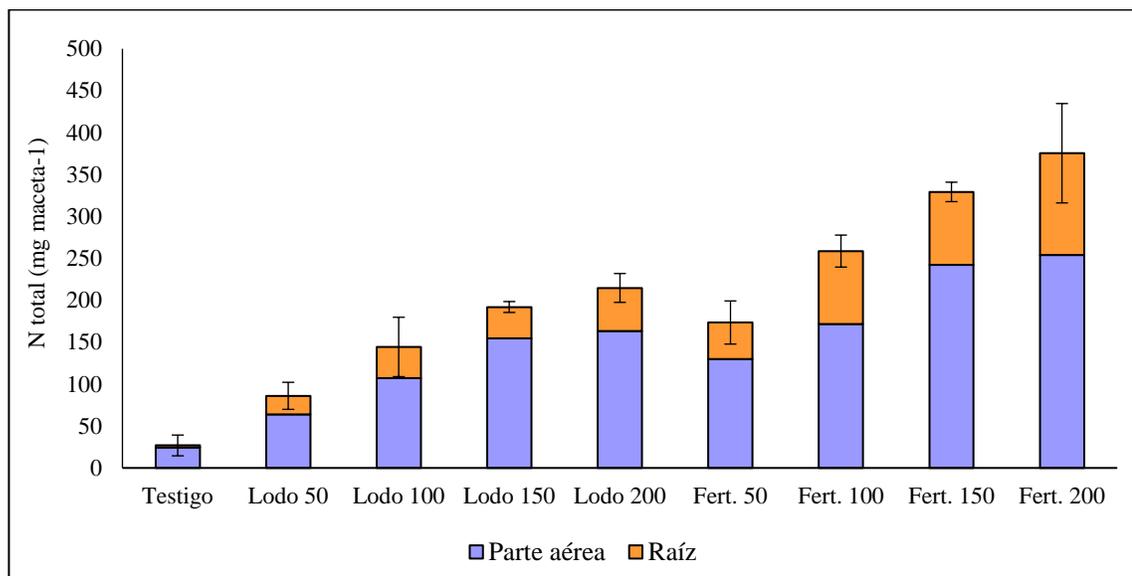


Figura No. 9. Contenido de N en parte aérea y raíz de sorgo

En este análisis la amplitud de los resultados de las repeticiones de cada dosis fue más variable en comparación a la biomasa. La dosis Fertilizante 200 fue la más variable seguida por la dosis Lodo 100.

En la Figura 10 se observa la misma tendencia que en las Figuras 8 y 9 pero en este caso analizando la absorción de P total por parte de las plantas. En el caso del P, el aumento en la cantidad extraída por maceta estuvo explicado por dos factores: el aumento en la producción de biomasa y el aumento en la concentración de P en la biomasa. La variabilidad de los resultados entre repeticiones fue muy acotado con excepción de la dosis Fertilizante 200 que presentó gran variabilidad.

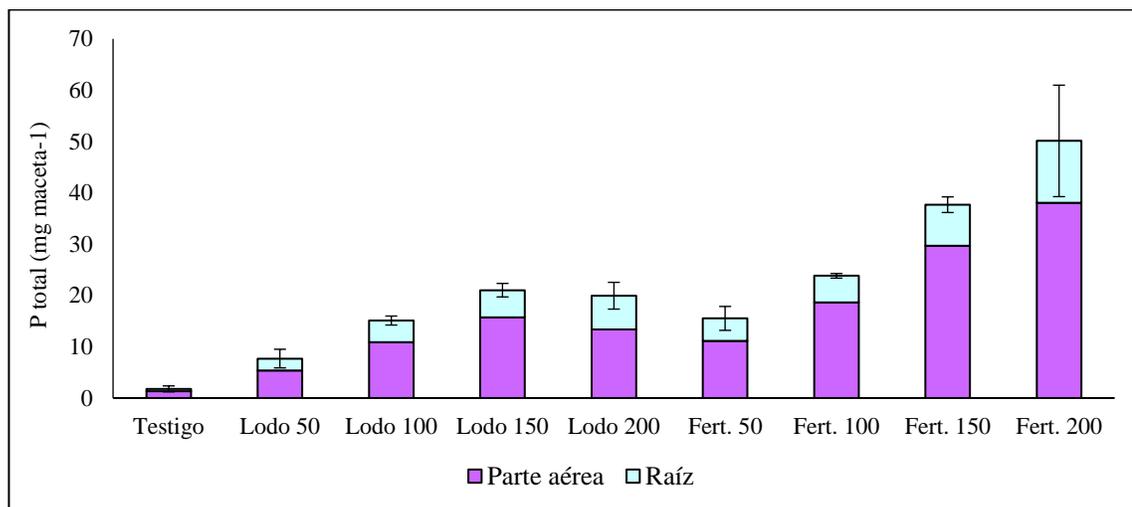


Figura No. 10. Contenido de P en parte aérea y raíz de sorgo

En base a los resultados presentados en las Figuras 8, 9 y 10 se nota un alcance de máximos de respuesta mayores con el agregado de fertilizante respecto al lodo; además cabe destacar que las diferencias evidenciadas entre lodo y fertilizante y, a su vez, entre las distintas dosis de cada material fueron estadísticamente significativas tanto en raíz como parte aérea. Además las dosis óptimas para el máximo rendimiento según las características de este experimento son Lodo 150 y Fertilizante 200, existiendo diferencias significativas de respuesta para los parámetros estudiados entre ambas.

En las Figuras 11, 12 y 13 se realizaron los ajustes de diferentes modelos a la respuesta en biomasa, N y P absorbidos por el sorgo en función de las dosis de lodo o fertilizante agregadas.

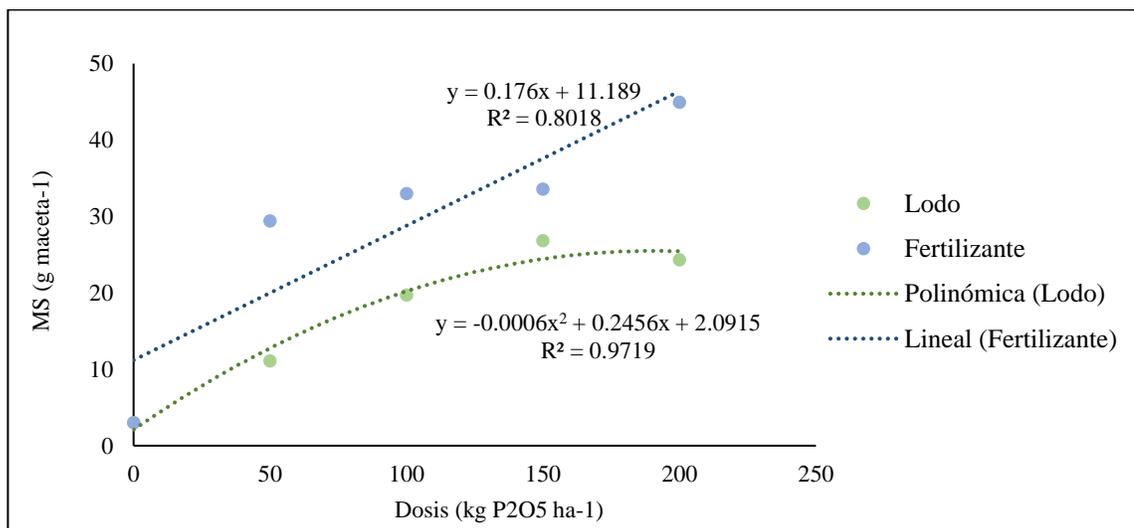


Figura No. 11. Ajuste de funciones de respuesta de biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante

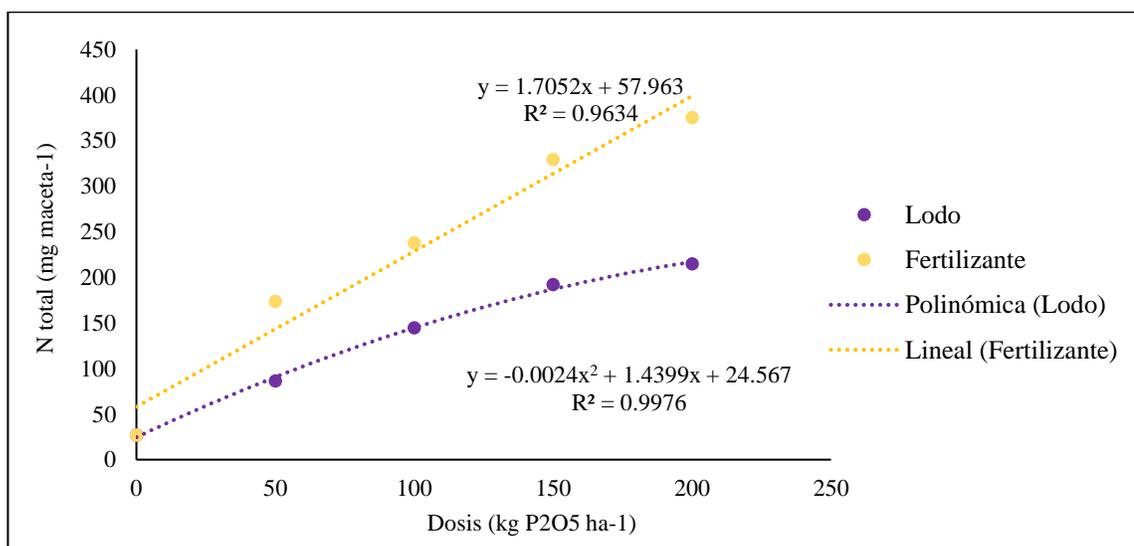


Figura No. 12 Ajuste de funciones de respuesta de contenido de N en la biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante

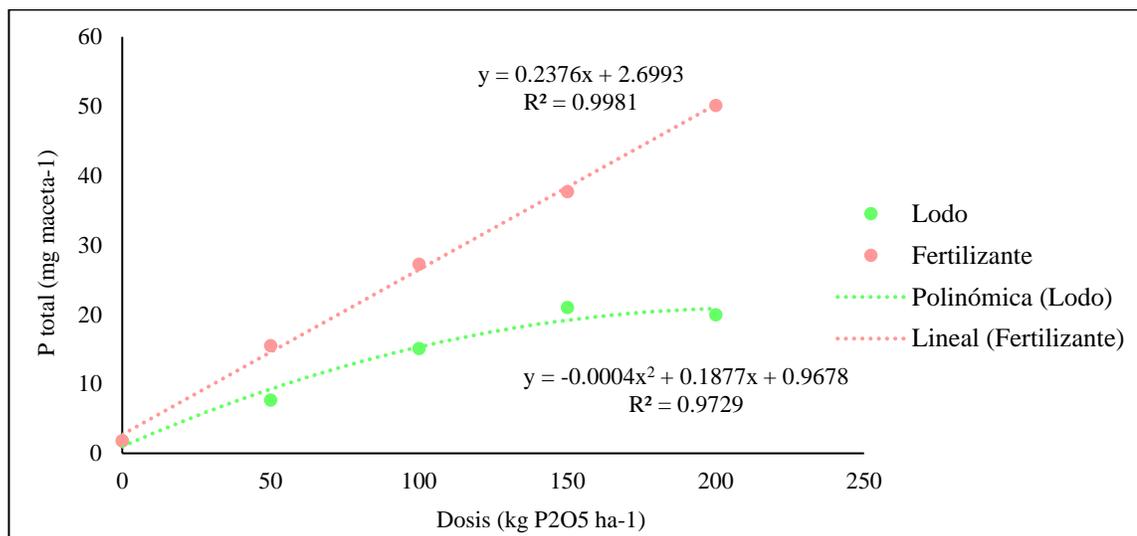


Figura No. 13. Ajuste de funciones de respuesta de contenido de P en la biomasa total de sorgo para lodo y fertilizante

La respuesta de las plantas al agregado de lodo y fertilizante se ajusta a modelos distintos, al menos para las dosis utilizadas. Mientras que para el agregado de lodo se percibe un mejor ajuste al modelo polinomial, o de porcentaje de suficiencia, para el agregado de fertilizante la respuesta tiene una tendencia lineal. El análisis estadístico realizado para los distintos parámetros confirmó también este ajuste. Al no tratarse del estudio de una ciencia exacta con una ley teórica previamente pautaada, solo se puede inferir y concluir en base a datos, entonces es importante tener en cuenta que estos supuestos se hacen a partir de los resultados de este trabajo, con un rango de dosis relativamente acotado. No se tiene ninguna certeza de cómo sería la respuesta de estas, u otras, plantas a mayores dosis y se podría incluso arriesgar a pensar que el modelo lineal ajustado al fertilizante podría convertirse en un modelo lineal-plateau al llegar al nivel crítico de agregado de este compuesto.

Los nutrientes poco móviles tienden a ajustarse al modelo en el cual la respuesta tiene incrementos decrecientes hasta llegar a un máximo que está dado básicamente por tres factores: el máximo rendimiento biológico de las plantas como seres vivos, la suficiencia de ese determinado nutriente y el supuesto de que ningún nutriente se puede sustituir. Por otra parte los nutrientes móviles podrían ajustarse mejor al modelo lineal-plateau basándose en la Ley del mínimo de Liebig, donde se asume que no hay interacción entre factores y el máximo rendimiento estará determinado por el nutriente o condición que se encuentre deficitaria; aquí también se asume que no hay sustitución. De acuerdo a esto, se podría inferir que es muy probable que el lodo contenga compuestos de menor movilidad que los presentes en el fertilizante.

Las respuestas presentadas en el Cuadro 5 permiten inferir, entre otros aspectos, que el suelo utilizado tenía carencias en contenido de N y P para el crecimiento del cultivo. Esto es coherente con la realidad por lo anteriormente expuesto acerca de suelos de prioridad forestal en Uruguay.

Cuadro No. 5. Respuesta relativa del contenido de N y P y producción biomasa de un cultivo de sorgo expuesto a distintos tratamientos con lodo y fertilizante respecto a un testigo

	N en planta	P en planta	Biomasa total
	-----%-----		
Testigo	100	100	100
Lodo 50	320	431	369
Lodo 100	537	847	656
Lodo 150	714	1178	894
Lodo 200	798	1118	811
Fert. 50	645	870	981
Fert. 100	962	1335	1099
Fert. 150	1224	2112	1119
Fert. 200	1395	2809	1498

Al comparar las respuestas del contenido N y P en planta, es probable que para los tratamientos con agregado de lodo, la dosis Lodo 200 ya estaría muy cerca al límite de aumento de respuesta, ya que el incremento de N en planta respecto a la dosis Lodo 150 fue muy reducido e incluso en el caso del P hubo una leve disminución. En cuanto a los tratamientos con fertilizante, para el contenido de N las dosis utilizadas probablemente estarían también llegando al límite de aumento de respuesta pero ya para el P no se podría tener ninguna seguridad de eso ya que la respuesta fue significativamente mayor y probablemente a mayores dosis aún hubiesen respuestas crecientes en el contenido del nutriente en planta.

La mayor respuesta en nutrientes respecto a la biomasa sugiere que puedan existir otras limitantes para el crecimiento del cultivo pero, por otra parte, se podrá observar una mejor calidad de producto, por ejemplo, en el caso del sorgo como forraje por su contenido de proteínas entre otras características.

## 5. CONCLUSIONES

En base a este trabajo y sus objetivos se obtienen algunas conclusiones.

En cuanto a la caracterización del material utilizado, el pH resultó ser alcalino situándose en torno a 8, el contenido de macronutrientes (N, P y K) en general fue bajo mientras que el contenido de C fue alto. La relación N/P fue relativamente baja (3,75) y la relación C/N de 9,33. Estas características permiten considerarlo como enmienda capaz de aportar nutrientes al ser aplicada al suelo.

En base a los resultados de respiración microbiana se concluye que el lodo utilizado en este experimento es de fácil descomposición debido a su elevado contenido de materia orgánica. Esto indica que se hacen disponibles sus compuestos orgánicos en el suelo con rapidez, aumentando su utilidad como enmienda en nuevas plantaciones.

El pH del suelo se ubicó en torno a 5 para todos los tratamientos: testigo, con agregado de lodo y fertilizante. Por las características de lodo se esperaba que en los tratamientos con agregado de este material el pH fuera menos ácido lo que estadísticamente sucedió pero en muy poca proporción respecto a lo esperado. Se infiere que esto sucedió por el poco tiempo que transcurrió hasta el último muestreo (90 días) y/o también porque podrían no ser suficientes las dosis aplicadas para producir un cambio más importante.

En referencia al contenido de N mineral y P disponible en el suelo, los tratamientos con lodo y fertilizante presentaron contenidos superiores que el testigo y el contenido de estos nutrientes fue en aumento conjuntamente con las dosis. Tratamientos con fertilizante presentaron aún mayores contenidos de N y P. Como las dosis aplicadas de fertilizante y lodo se ajustaron teniendo en cuenta el contenido de N y P de cada material, se puede concluir que estas diferencias podrían estar dadas por los tipos de compuestos presentes en cada material que en el caso del lodo serían de lenta mineralización. Esta característica puede atribuirse al proceso de generación del lodo. Además, se debe tener presente que un fertilizante sintético disponibiliza sus nutrientes casi inmediatamente, mientras la fracción orgánica del lodo requiere un tiempo para mineralizarse.

En cuanto a la producción de biomasa total, contenido de N y contenido de P de las plantas de sorgo bajo los distintos tratamientos se concluye que las tres variables presentan respuestas muy similares dentro de cada material y que son altamente dependientes de las dosis aplicadas de cada uno de ellos. A mayores dosis existen máximos de respuestas mayores y los resultados fueron superiores con el fertilizante respecto al lodo. Esto, a su vez, también permite concluir que el suelo de prioridad forestal utilizado tenía bajo contenido de N y P para el adecuado desarrollo de estas plantas.

En biomasa se observó una disminución de respuesta con la dosis de lodo equivalente a  $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , la cual no ocurrió para el contenido de P y N por ende se concluye que podría haber algún factor o compuesto del lodo que pueda estar interfiriendo negativamente en el crecimiento de las plantas a altas dosis. Se reafirma la gran importancia de aportar cantidades adecuadas de enmiendas orgánicas, para lo cual se hace fundamental la correcta caracterización del material y el suelo utilizados.

La respuesta de las plantas al agregado de lodo y fertilizante se ajusta a modelos distintos entre materiales tanto para biomasa total, N como P. Mientras que para el agregado de lodo el mejor ajuste es polinomial para el agregado de fertilizante la respuesta tiene una tendencia lineal. De acuerdo a este ajuste, se podría inferir que es muy probable que el lodo contenga compuestos de menor movilidad que los presentes en el fertilizante, lo cual afirmaría la conclusión del análisis a nivel de N mineral y P disponible en suelo.

En base a todo lo expuesto en esta tesis, se concluye finalmente que el lodo estudiado presentó muy buenos resultados en cuanto a su aporte de N y P al suelo así como también al crecimiento y absorción de estos nutrientes por parte de las plantas. Se destacan además otras características positivas del material (aunque no se reflejó por completo el efecto de éstas en los resultados de este trabajo) como lo son su alto valor de pH para ser usado en suelos ácidos, contenido importante de micronutrientes y C, y baja CE. Se puede inferir además que el comportamiento de las plantas de sorgo bajo estudio podría proyectarse a otras especies como por ejemplo, por ser de particular interés, las del género *Eucalyptus*. Por último, no es de restarle importancia el hecho de que se trate de un material desecado y aun así se obtengan tan buenos resultados ya que la logística para hacer su uso práctico se hace mucho más eficiente de esta forma. Darle un uso como enmienda orgánica a este material se considera productiva, económica y ambientalmente eficiente. Para el rango de dosis y el suelo utilizados en este trabajo, teniendo en cuenta todos los resultados, la dosis que alcanzó las mejores respuestas para el lodo utilizado fue la equivalente al agregado de  $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Sin embargo es importante aclarar que debería comprobarse si las dosis son igual de eficientes en experimentos a campo ya que no se debería descartar la posibilidad de que por tratarse de un ensayo macetero hubiese acumulación de algún compuesto haciendo con que la dosis equivalente a  $200 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  no fuese la mejor.

## 6. RESUMEN

Las plantas de producción de celulosa generan subproductos, cuya gestión presenta dificultades desde el punto de vista ambiental. Una alternativa es su gestión como enmienda aplicada al suelo en replantaciones, lo cual permitiría además sustituir en parte el uso de recursos no renovables como los fertilizantes. El objetivo de este trabajo fue la evaluación de una mezcla de lodos deshidratados de precipitación de P proveniente de la planta industrial de producción de celulosa de UPM ubicada en Fray Bentos-Uruguay. El suelo utilizado fue de prioridad forestal proveniente de la unidad de suelos Algorta del litoral uruguayo y se evaluaron los efectos desde la perspectiva del aporte de nutrientes a las plantas y al suelo, en especial N y P. Para esto se hizo un experimento de incubación, donde se hicieron muestreos periódicos de suelo y evaluación de la actividad microbiana en el suelo con el agregado de cuatro diferentes dosis de lodo y fertilizante (fosfato de K y urea) comparables en sus niveles de N y P. Paralelamente se hizo un experimento de invernáculo con un seguimiento de aproximadamente 3 meses donde se evaluó el crecimiento de plantas de sorgo con dosis idénticas al experimento de incubación. Los resultados obtenidos para el agregado de lodo fueron satisfactorios, observándose rendimientos superiores al testigo en todas las dosis y en dosis elevadas incluso similares a las plantas con fertilizante sintético. El lodo utilizado presentó un contenido de materia seca de 95 %; pH alcalino situándose en torno a 8; contenido de macronutrientes (N, P y K) en general bajo siendo N el macronutriente en mayor concentración (2 %) y alto contenido de C (28 %). La relación N/P fue de 3,75 y la relación C/N de 9,33. Respecto a micronutrientes tiene elevada concentración de Mn y principalmente Fe. Entre las bases intercambiables Ca fue el catión mayoritario y Na se encontró en bajas concentraciones. La conductividad eléctrica fue baja ubicándose en torno a 2,4. En cuanto al análisis de suelo el N mineral, para las distintas dosis de lodo, abarcó un rango desde 26,2 mg kg<sup>-1</sup> de suelo a 61,5 mg kg<sup>-1</sup> de suelo respecto a un testigo de 17,5 mg/kg de suelo. Por otra parte, el P Bray 1 varió entre 9,6 a 16 mg kg<sup>-1</sup> de suelo respecto a un testigo de 8 mg kg<sup>-1</sup> de suelo. Los resultados medidos en planta de biomasa total, N y P respondieron todos de forma muy similar aumentando en función al aumento de dosis aplicadas de cada material y produciéndose máximos de respuesta mayores en los tratamientos con agregado de fertilizante respecto al lodo. Se ajustaron modelos de respuesta para las tres variables analizadas siendo para el lodo todas ajustadas a un modelo polinomial y para el fertilizante a un modelo lineal. Los resultados concluyen que el uso de este material como enmienda orgánica en este tipo de suelo es muy útil obteniéndose muy buenas respuestas a su agregado a nivel de suelo y planta. La mejor dosis de lodo a aplicar de acuerdo a los resultados de este trabajo es la de 150 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.

Palabras clave: Lodo; Industria celulósica; Uruguay; Fertilidad; Enmiendas.

## 7. SUMMARY

Cellulose industry generates by-products difficult to handle from the environmental point of view. An alternative use for these compounds is as an amendment applied to the soil in replanting, which would also partially replace the use of non-renewable resources such as synthetic fertilizers. The main purpose of this work was to assess the evaluation of a mixture of dehydrated P precipitation sludge from UPM's pulp production industry located in Fray Bentos-Uruguay. The soil used for the experiment was forestry priority from Algorta, a soil unit of the Uruguayan littoral and the effects were evaluated from the perspective of the nutrients' contribution to plants and soil, especially N and P. For this, an incubational experiment was done, with periodic soil sampling and evaluation of microbial activity in the soil with the addition of four different doses of sludge and synthetic fertilizer (potassium phosphate and urea) comparable in their N and P levels. In parallel, a greenhouse experiment was carried on with a follow-up of approximately 3 months where the growth of Sorghum plants was evaluated with identical doses to the incubational experiment. The results obtained for the sludge were satisfactory, observing superior yields to the control in all the doses and in high doses even similar to treatments with synthetic fertilizer. The sludge used had a dry matter content of 95 %; alkaline pH around 8; content of macronutrients (N, P and K) in general low being N the macronutrient in higher concentration (2 %) and high content of C (28 %). The N/P ratio was 3.75 and the C/N ratio was 9.33. Regarding micronutrients, it has a high concentration of Mn and mainly Fe. Among the interchangeable bases, Ca was the cation found in higher concentrations and Na was found in lower concentrations. The electrical conductivity was low, being around 2.4. Regarding the soil analysis, the mineral N, for the different doses of sludge, covered a range from 26.2 mg kg<sup>-1</sup> of soil to 61.5 mg kg<sup>-1</sup> of soil respect to a control of 17.5 mg/kg of soil. On the other hand, P Bray 1 varied between 9.6 to 16 mg kg<sup>-1</sup> of soil in comparison to a control of 8 mg kg<sup>-1</sup> of soil. The results of biomass and N and P contents in plant all responded in a very similar way, directly increasing to doses applied from each material having better response in treatments with added fertilizer compared to the sludge. Response models were adjusted for the three variables analyzed, being the sludge adjusted to a polynomial model and the fertilizer to a linear model. The results conclude that the use of this material as an organic amendment in this type of soil is very useful, resulting on positive response to its application in soil and plant qualities. The best dose of sludge to apply according to the results of this work is 150 kg of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.

Keywords: Sludge; Mud; Cellulose Industry; Uruguay; Fertilization; Amendment.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, J. 1982. Soil Respiration. In: Page, A. L. ed. Methods of Soil Analysis. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 2, pp. 837–887 (Agronomy Monographs no. 9).
2. Barbazán, M.; del Pino, A.; Moltini, C.; Hernández, J.; Rodríguez, J. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(1): 82-92.
3. Beauchamp, E.; Paul, J. 1989. A simple model to predict manure N availability to crops in the field. In: Hansen, J. A.; Henriksen, K. eds. Nitrogen in organic wastes applied to soils. Boston, Harcourt Brace Jovanovich. pp. 140-149.
4. Bremner, J.; Mulvaney, C. 1982. Nitrogen-Total. In: Page, A. L. ed. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 2, pp. 595-624 (Agronomy Monographs no. 9).
5. Brookes, P.; Cayuela, M.; Contin, M.; De Nobili, M.; Kemmitt, S.; Mondini, C. 2008. The mineralisation of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. *Waste Management*. 28(4): 716-722.
6. Califra, A.; Ruiz, A.; Alliaume, F.; Durán, A. 2007. Contribución al estudio de los suelos “Algorta”. *Agrociencia (Uruguay)*. 11(1): 35-46.
7. Casanova, O.; Barbazán, M.; del Pino, A. 2013. Evaluación agronómica de lodos de la industria maltera. *Cangüé*. no. 33: 2-8.
8. Dao, T.; Cavigelli, M. 2003. Mineralizable carbon, nitrogen, and waterextractable phosphorus release from stockpiled and composted manure and manure-amended soils. *Agronomy Journal*. 95(2): 405-413.
9. del Pino, A.; Repetto, C.; Mori, C.; Perdomo, C. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latinoamericana*. 26(1): 43-52.
10. \_\_\_\_\_; Hernández, J. 2013. Evaluación de la aptitud de uso e impacto ambiental de la aplicación como enmienda al suelo de residuos provenientes de plantas de celulosa. Montevideo, Facultad de Agronomía. 35 p.
11. Durán, A. 1991. Los suelos del Uruguay. Montevideo, Hemisferio Sur. 398 p.

12. Eghball, B.; Power, J. 1999a. Composted and noncomposted manure application to conventional and no-tillage systems: corn yield and nitrogen uptake. *Agronomy Journal*. 91(5): 819-825.
13. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. 1999b. Phosphorus and nitrogen based manure and compost applications: corn production and soil phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*. 63(4): 895–901.
14. Griffin, T.; Honeycutt, C. 2000. Using growing degree days to predict nitrogen availability from livestock manures. *Soil Science Society of America Journal*. 64(5): 1876-1882.
15. Isaac, R.; Kerber, J. 1971. Atomic Absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. In: Walsh, L. M. ed. *Instrumental Methods for Analysis of Soil and Plant Tissues*. Madison, WI, SSSA. pp. 17-37.
16. Lindsay, W.; Norvell, W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421-428.
17. MGAP. OPYPA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, UY). 2016. Anuario OPYPA 2016. Montevideo. 580 p.
18. Murphy, J.; Riley, J. 1962. A modified single solution methods for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*. 27: 31-36.
19. Nelson, D.; Sommers, L. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L. ed. *Methods of Soil Analysis*. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, SSSA. pt. 3, pp. 961-1010.
20. Paul, E. 2007. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Oxford, Academic Press. 532 p.
21. Ribeiro, A.; Albuquerque, A.; Quinta-Nova, L.; Cavaleiro, V. 2010. Recycling pulp mill sludge to improve soil fertility using GIS tools. *Resources, Conservation and Recycling*. no. 54: 1303-1311.
22. Sharpley, A.; Meisinger, J.; Breeuwsma, A; Sims, J.; Daniel, T.; Schepers, J. 1998. Impacts of animal manure management on ground and surface water quality. In: Hatfield, J. L.; Stewart, B. A. eds. *Animal waste utilization: effective use of manure as a soil resource*. Boca Ratón, FL, CRC. pp. 173-242.

23. Trinsoutrot, I.; Recous, S.; Bentz, B.; Linères, M.; Chèneby, D.; Nicolardot, B. 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3): 918-926.
24. Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirement determinations. In: Westerman, R. L. ed. *Soil Testing and Plant Analysis*. 3<sup>rd</sup>. ed. Madison, WI, SSSA. pp. 73-126.
25. Vettorazzo, S.; Amaral, F.; Chitolina, J. 2001. Nutrient leaching potential following application of papermill lime-sludge to an acid clay soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 25(3): 755-763.
26. Walkley, A.; Black, T. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science Society of America Journal*. 37: 29-38.
27. Whalen, J. K.; Chang, C.; Clayton, G.; Carefoot, J. P. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3): 962-966.

## 9. ANEXOS



Plantas de sorgo bajo todos los tratamientos a los 30 días



Plantas de sorgo bajo todos los tratamientos a los 90 días



Plantas de sorgo a los 75 días, desde la izquierda a derecha se ven el testigo, dosis lodo 200 y dosis fertilizante 200



Plantas de sorgo a los 90 días, desde la izquierda a derecha se ven el testigo, dosis lodo 150 y dosis fertilizante 200