

Efectos de la aplicación de cenizas de caldera de biomasa en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas

CARLA GUILLÉN ESCRIBÀ

Licenciatura de Ciencias Ambientales, febrero 2013. Universitat Autònoma de Barcelona.

Director: Josep Maria Alcañiz Baldellou. Tutores: Nahia Gartzia Bengoetxea y Ander González Arias.

RESUMEN. Se ha estudiado los efectos que tiene la aplicación de cenizas de caldera de biomasa, en el modelo jerárquico de agregación (Tisdall y Oades, 1982) y en la estabilización del C orgánico en un suelo forestal situado en la zona templada del País Vasco. Para ello, se aplicaron 3 tratamientos con diferentes dosis de ceniza en muestras de suelo tamizadas a 250 µm procedentes de un huerto semillero de *pinus radiata*. Estas muestras fueron incubadas durante 3 meses y fraccionadas los días 29, 44, 64, 78 y 92 con la intención de separar los macroagregados grandes (LMagg), de los macroagregados pequeños (Magg), microagregados (magg), limos (silt) y arcillas (clay). Todas las fracciones fueron analizadas para determinar su contenido en C orgánico. Los resultados mostraron que con la aplicación de cenizas, el modelo jerárquico de agregación de suelo se cumple para las fracciones LMagg, Magg y magg, pero no para la fracción silt. Además se ha observado que las cenizas promueven la formación de microagregados aumentando así la capacidad de secuestro de C del suelo, pero en cambio disminuye la proporción de macroagregados, hecho que podría acarrear una disminución en la calidad estructural del suelo.

Palabras clave: cenizas de caldera de biomasa, zona templada, estabilización de C orgánico, modelo jerárquico de agregación, capacidad de secuestro de C, calidad estructural del suelo

RESUM. S'ha estudiat els efectes que té l'aplicació de cendres de caldera de biomassa, en el model jeràrquic d'agregació (Tisdall i Oades, 1982) i estabilització del C orgànic en un sòl forestal situat a la zona temperada del País Basc. Per fer-ho, es van aplicar 3 tractaments amb diferents dosis de cendra en mostres de sòl tamisades a 250 µm procedents d'una plantació de *pinus radiata*. Aquestes mostres van ser incubades durant 3 mesos i fraccionades els dies 29, 44, 64, 78 i 92 amb la intenció de separar els macroagregats grans (LMagg), dels macroagregats petits (Magg), microagregats (magg), llims (silt) i argiles. Totes les fraccions van ser analitzades per determinar el seu contingut en C orgànic. Els resultats van mostrar que amb l'aplicació de cendres, el model jeràrquic d'agregació del sòl es compleix per a les fraccions LMagg, Magg i magg però no per a la fracció silt. A més s'ha observat que les cendres promouen la formació de microagregats augmentant d'aquesta manera la capacitat de segrest de C del sòl, però en canvi disminueix la proporció de macroagregats, fet que podria implicar una disminució en la qualitat estructural del sòl.

Paraules clau: cendres de caldera de biomassa, zona temperada, estabilització de C orgànic, model jeràrquic d'agregació, capacitat de segrest de C, qualitat estructural del sòl.

ABSTRACT. The aim of this study was to evaluate the effects of biomass boiler ashes application on the hierarchical model of aggregation and stabilization (Tisdall and Oades, 1982) in a forest soil located in the Basque Country temperate region. To this end, three treatments with different ash doses were applied in a 250 µm sieved soil samples from a *pinus radiata* forest. Those samples were incubated for 3 months and fractionated at days 29, 44, 64, 78 and 92 to isolate large macroaggregates (LMagg), small macroaggregates (Magg), microaggregates (magg), silt and clay fractions. All fractions were analyzed for organic C content. The results showed that with ash application, the hierarchical model of aggregation holds for LMagg, Magg and magg fractions but not to silt fraction. In addition, results indicate that ashes promote microaggregates formation increasing soil C sequestration but instead, reduce macroaggregates proportion, which could lead to a soil structural quality decrease.

Key words: biomass boiler ashes, hierarchical model of aggregation, temperate region, organic C stabilization, soil C sequestration capacity, soil structural quality.

1. INTRODUCCIÓN

La adaptación de los bosques al cambio climático es de una importancia crítica. A nivel local, la gestión forestal y la silvicultura pueden influir en el secuestro de carbono, la reacción de los bosques al cambio climático y los servicios forestales prestados a las poblaciones locales.

Varios ensayos silvícolas de gran escala y a largo plazo han estado y están actualmente en marcha, proporcionando una base sólida de conocimientos científicos y herramientas necesarias, para guiar a los gestores forestales hacia la puesta en práctica de una silvicultura adaptativa al cambio climático (Oliver, W., 2000). Una de las prácticas silvícolas que se está llevando a cabo ya desde hace unos años, es la aplicación de cenizas procedentes de la combustión de madera, en suelos forestales. Las cenizas se obtienen por la combustión de madera o corteza de madera en diferentes industrias de fabricación de tableros y pasta de papel para la obtención de energía. Las elevadas cantidades de este residuo y el coste que representa su almacenaje ha suscitado un interés en la búsqueda de alternativas (Solla-Gullón, F., et al. 2001). Las cenizas procedentes de la biomasa forestal provienen de los minerales presentes en la estructura de los árboles y arbustos (Demeyer, A et al., 2001), así pues, éstas pueden ser empleadas en suelos forestales de carácter ácido puesto que en cantidades moderadas devuelven al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal. A parte de estas propiedades, diferentes estudios muestran que las cenizas estimulan la actividad microbiana y mineralización del suelo, tienen efecto encalante (Ohno y Erich, 1990) y actúan como un potencial fertilizante mejorando el crecimiento y mantenimiento de las funciones forestales (Silfverberg y Huikari 1985).

El principal objetivo de este proyecto ha sido realizar un ensayo de laboratorio manteniendo condiciones controladas de humedad y temperatura de muestras de suelo recogidas en huerto semillero de *pinus radiata*, con la finalidad de analizar el efecto de la aplicación de cenizas en el modelo jerárquico de agregación del suelo y en la dinámica de estabilización de la materia orgánica en los diferentes agregados. Sin embargo, cabe señalar que de forma extra, se ha participado en la construcción de una infraestructura para llevar a cabo una monitorización y un posterior análisis del efecto de la aplicación de cenizas en las propiedades físicas del suelo a largo plazo.

2. METODOLOGÍA

Las muestras de suelo fueron recogidas en un huerto semillero de *pinus radiata* localizado en el municipio del Valle de Karrantza. Este Valle, se encuentra dentro del territorio climático de la vertiente atlántica, presentando así un clima oceánico con temperaturas que se encuentran alrededor de los 7°C de media durante los meses de invierno y no sobrepasan los 20° C en los meses de verano. Las precipitaciones medias acumuladas durante el año rondan los 1100-1200mm. En relación a las características litológicas y edafológicas, el huerto semillero se encuentra sobre un suelo formado por lutitas y areniscas oscuras de grano muy fino. Presenta un pH bajo (entre 4,5 y 3,6), es pobre en materia orgánica y en cuanto a nutrientes: fósforo inapreciable, bajos niveles de nitrógeno, potasio y magnesio y alto porcentaje de saturación de aluminio.

En las parcelas de ensayo, se recogieron tres muestras al azar de los primeros 10 centímetros de suelo. Posteriormente fueron tamizadas a <250 μm para romper los macroagregados grandes y pequeños que pudieran haber. A continuación se determinó la capacidad de campo para conocer el contenido de agua que podía retener nuestro suelo y así poder conservar su humedad durante todo el periodo de incubación hasta el proceso de fraccionamiento. Los tratamientos de ceniza que se aplicaron a las muestras, fueron todos calculados respecto a la cantidad equivalente de calcio de su tratamiento homólogo de biochar¹, así se obtuvieron los 3 tratamientos siguientes: **C2** (Cantidad equivalente de Ca^{2+} en cenizas respecto al tratamiento B2), **C10** (Cantidad equivalente de Ca^{2+} en cenizas respecto al tratamiento B10), **CN** (Cantidad equivalente de Ca^{2+} en cenizas con N respecto al tratamiento BN), más un tratamiento control que no contenía ninguna enmienda.

Posteriormente se prepararon 60 anillos de incubación de 5cm de diámetro y 2,5cm de profundidad con las muestras de suelo más la cantidad de cenizas correspondientes a cada uno de los 4 tratamientos. La tierra colocada en el anillo fue sostenida sobre una malla de nylon de 53 μm de luz y compactada a una densidad aparente aproximada de 1,2 g/cm^3 . A su vez, dichos anillos se introdujeron dentro de frascos de vidrio. Para conocer cada cuantos días era necesario abrir los frascos a lo largo del periodo de incubación, se determinó la respiración basal del suelo con la finalidad de que la concentración de oxígeno dentro de ellos no fuera en ningún momento inferior al 10% . Así, después de realizar diferentes determinaciones, se comprobó que el volumen de O_2 consumido a los tres días no descendía del 10% mínimo, así que se decidió abrir los botes cada 3 días.

Posteriormente los anillos fueron introducidos en frascos de vidrio y colocados en la estufa termostatzada. Durante el periodo de incubación, se realizaron fraccionamientos de las muestras los días 24, 44, 64, 78 y 92. El fraccionamiento físico del suelo se realizó mediante un proceso de tamizado en húmedo de acuerdo con Elliot (1988) llevado a cabo con un equipo de tamizado en húmedo Eijkelkamp®.

El objetivo fue separar los agregados estables de diferente tamaño: macroagregados grandes (LMagg), macroagregados pequeños (Magg), microagregados (magg), y las partículas primarias del suelo: limos (silt) y arcillas (clay), de las muestras incubadas. Posteriormente se determinó el contenido en carbono orgánico total de las diferentes fracciones mediante una oxidación por vía húmeda a 150°C. La determinación del Stock de carbono en el suelo se realizó multiplicando la proporción de cada fracción por su concentración de C orgánico.

¹ Para poder entender las dosis de ceniza aplicada para cada uno de los tratamientos seleccionados, se debe explicar previamente de una forma resumida, el proceso de creación de las parcelas (ensayo de campo) que se realizó con anterioridad a este estudio. El ensayo de campo se basó en el establecimiento de una infraestructura (parcelas de monitorización) para la evaluación del impacto climático y el análisis de los efectos de la aplicación de una práctica silvícola, basada en la reutilización de residuos forestales provenientes de la quema de biomasa (biochar y cenizas). Así pues, el ensayo consistió básicamente, en la elaboración de 63 parcelas donde se les aplicó a cada una de ellas, diferentes concentraciones de biochar o ceniza. Se decidió que los tres tratamientos de biochar, tuvieran 2t de C/ha de biochar (B2), 10t de C/ha de biochar (B10) y 10t de C/de biochar con 0.8% de N (BN), respectivamente. Así pues, la dosis de ceniza fue calculada respecto a éstas dosis.

El análisis estadístico de los resultados se llevó a cabo con el programa StatView[®] versión 5.0.1, Institute Inc. 1998. Para ello se utilizó el análisis de varianza ANOVA de medidas repetitivas, con el fin de determinar las diferencias significativas entre los diferentes tratamientos y entre los periodos de incubación. Se compararon los tratamientos, y los análisis post-hoc fueron realizados mediante el test de Fisher. Los resultados significativos están basados en un nivel de probabilidad de $p=0.05$.

3. RESULTADOS

Dinámica de agregación del suelo tras la aplicación de cenizas.

La figura 1 representa la evolución del porcentaje de las fracciones LMagg, Magg, magg, silt y clay a lo largo de todo el periodo de incubación para los cuatro tipos de tratamiento. Se puede observar que con la aplicación de diferentes dosis de ceniza en el suelo se obtuvieron dinámicas de agregación también diferentes.

El análisis estadístico muestra que no hay diferencias significativas entre la cantidad de **LMagg** que se encuentra en C10 y la que se encuentra en CN y del mismo modo, entre la cantidad de LMagg en CC y la que encontramos en C2. Así, se observa que en los tratamientos CC;C2², la cantidad de LMagg es superior que en C10;CN para todo el periodo de incubación

En relación al porcentaje de **Magg**, el análisis estadístico muestra que no hay diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, se observa una ligera tendencia de aumento en la proporción de Magg con el tiempo para los cuatro tipos de tratamientos.

Para la proporción de **magg** todos los tratamientos muestran diferencias significativas entre ellos menos entre CC y C2. La cantidad de magg en CN es superior a lo largo de todo el periodo de incubación a la cantidad de magg en C10 seguido de CC;C2. Se observa un aumento significativo de la proporción de magg a lo largo del tiempo para CN, pasando de un $10.5 \pm 0.4\%$ en el día 29 a un $20 \pm 3\%$ al final de la incubación. En C10, la cantidad de magg se duplica de un $9.5 \pm 1.8\%$ a un $18.1 \pm 2.1\%$ del día 29 al 78, pero a partir de aquí disminuye hasta un $14.4 \pm 1.2\%$.

En relación a la fracción **silt**, el análisis estadístico muestra diferencias significativas entre los tratamientos menos entre CN y C10. Se observa un incremento en la cantidad de silt para todos los tratamientos desde el día 29 hasta el final de la incubación. No obstante, la cantidad de silt en C10; CN es mayor que la cantidad observada en CC y C2 a largo de toda la incubación

Finalmente, para la fracción **clay**, el análisis estadístico muestra que no hay diferencias significativas entre tratamientos. No obstante, se puede intuir un incremento en la cantidad de clay para todos los tratamientos desde el día 29 hasta el final de la incubación.

² Los pares de tratamientos que no presentan estadísticamente diferencias significativas, se representan separados por un punto y coma formando así un único grupo, tal y como se observa en el siguiente ejemplo: T1; T2, donde: T1: tratamiento 1 y T2: tratamiento 2.

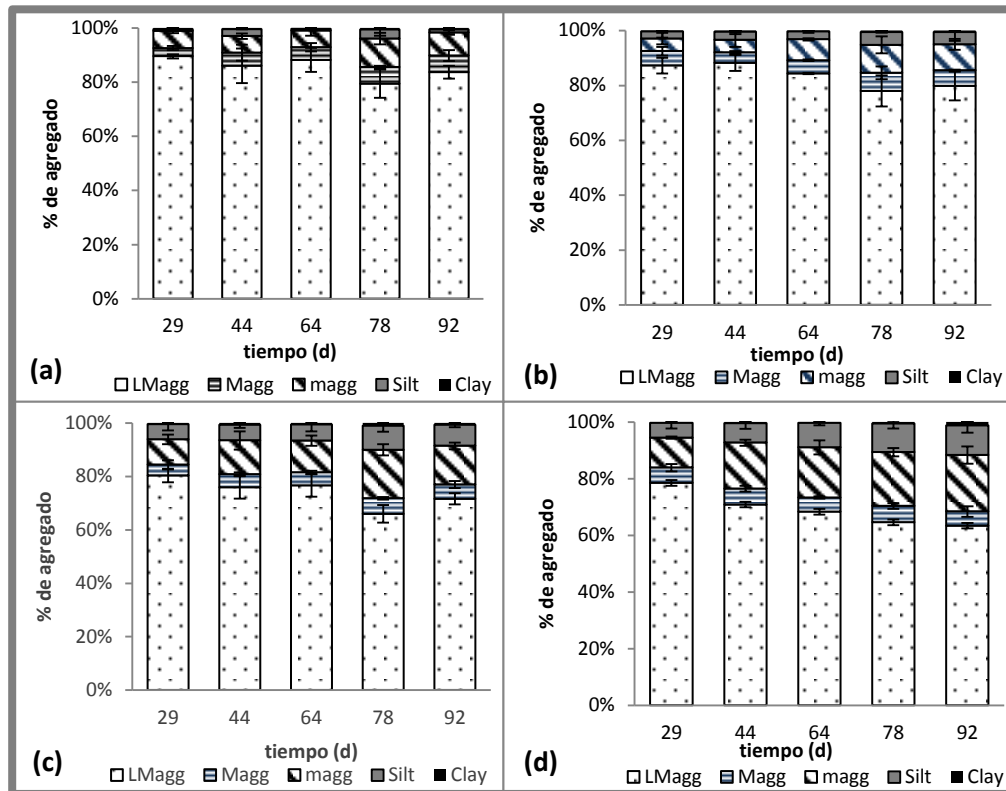


Figura 1. Evolución de la concentración de C orgánico en cada tamaño de agregado (LMagg, Magg, magg, silt) a lo largo del periodo de incubación, para el tratamiento CC (a), C2 (b), C10 (c) y CN (d). Fuente: propia

Distribución del C orgánico en las diferentes fracciones de agregados.

Los resultados de la concentración de C orgánico en las fracciones LMagg, Magg, magg y silt a lo largo de todo el periodo de incubación están representados en la figura 2. El análisis estadístico muestra que hay diferencias significativas entre los tratamientos, menos entre C10 y CN para las fracciones LMagg y silt, y menos entre C10 - CN y entre CC - C2 para Magg y magg. En general, las mayores diferencias se observan entre el grupo CC -C2 y el grupo C10-CN. Esto significa que la dosis de ceniza, al igual que en la dinámica de agregación, ha tenido efectos sobre la concentración de C orgánico en los agregados; a más dosis, más concentración de C encontramos en las diferentes fracciones

La concentración de C orgánico en **LMagg** fue mayor a lo largo de toda la incubación en los tratamientos C10;CN que en C2 seguido de CC. En relación a la concentración de C orgánico en **Magg**, también se observa que ésta fue mayor a lo largo de toda la incubación en los tratamientos C10;CN que en CC;C2.

De nuevo, la concentración de C orgánico en los **magg** fue mayor para todo el periodo de incubación en los tratamientos C10;CN que en CC;C2. Así pues, al igual que en los LMagg, los magg que se encuentran en las muestras con tratamiento C10;CN, vuelven a presentar un aumento de la concentración de C orgánico desde el día 29 al 44, con un máximo que se encuentra entorno al $26.9 \pm 0.9 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1}$ de magg y al $28.5 \pm 1.2 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1}$ de magg respectivamente. La concentración de C orgánico en la fracción **silt** tiene una tendencia diferente en comparación con las fracciones LMagg, Magg y magg, sin embargo, se vuelve a encontrar de nuevo mayor concentración de C orgánico para los silt de las muestras con los tratamientos C10;CN que para los silt de las muestras con CC;C2.

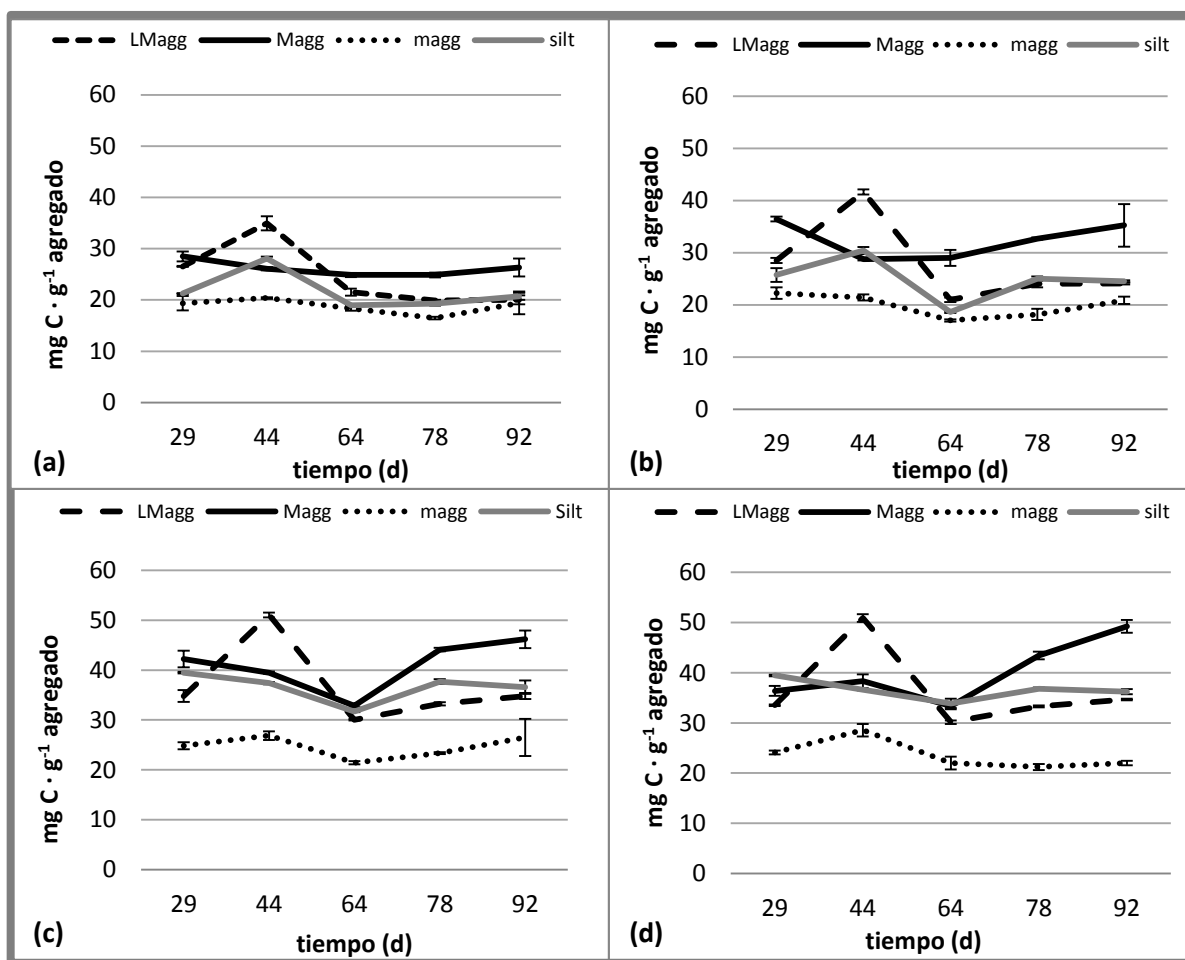


Figura 2. Evolución de la concentración de C orgánico en cada tamaño de agregado (LMagg, Magg, magg, silt) a lo largo del periodo de incubación, para el tratamiento CC (a), C2 (b), C10 (c) y CN (d). Fuente: propia

Stock de C orgánico en el suelo

El análisis estadístico realizado para comparar la variación del Stock de C orgánico en las diferentes fracciones, muestra que en la figura 3 pueden observarse cuatro aspectos principales; primero, se observa que la mayor parte del carbono orgánico del suelo se almacena en la fracción LMagg durante todo el periodo de incubación para los cuatro tipos de tratamiento y además, muestra que el tratamiento CC almacena más C orgánico en LMagg en comparación con C10;CN. Segundo, no existen diferencias significativas entre tratamientos para la fracción Magg en ningún momento a lo largo de todo el periodo de incubación. Tercero, un aumento de la dosis de cenizas ha resultado en un aumento significativo de la cantidad de C orgánico estabilizado en las fracciones magg en C10;CN en comparación con C2 seguido de CC durante todo el periodo de incubación. Y tercero, un aumento de la dosis de ceniza ha resultado en que la cantidad de C orgánico almacenado en los silt sea mayor en CN que en C10 seguido de C2 y CC a partir del día 44.

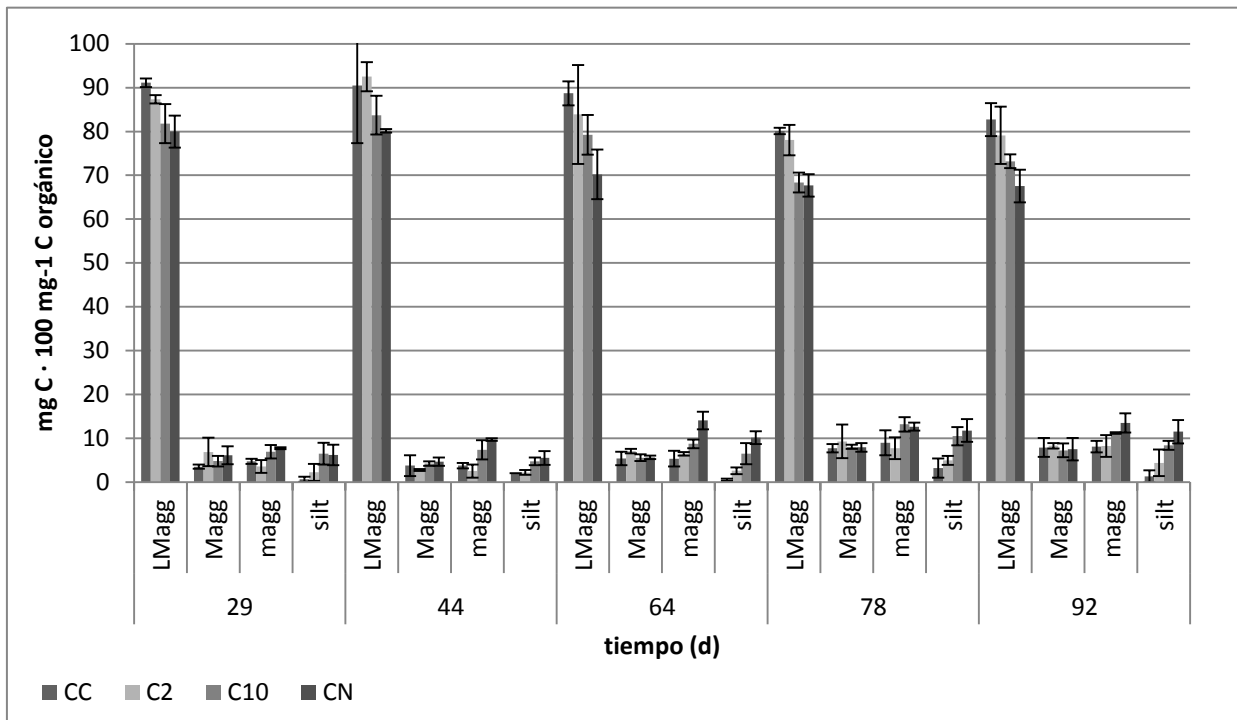


Figura 3. Variación del Stock de C en el suelo para cada tamaño de agregado del suelo a lo largo de todo el periodo de incubación, para los tratamientos CC, C2, C10 y CN. Fuente: propia

4. DISCUSIÓN

Numerosos estudios han demostrado que en los suelos templados en los que la fracción mineral está dominada por silicatos, la dinámica de agregación y la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) están directamente relacionadas de acuerdo al modelo jerárquico de formación y estabilización de agregados (Tisdall y Oades, 1982). Según Six et al. (2000), tres consecuencias se derivan de este modelo jerárquico de agregación: (1) una descomposición gradual de los macroagregados en microagregados (Oades y Waters, 1991), (2) un aumento en la concentración de C orgánico a medida que aumenta el tamaño de agregado y (3) un contenido mayor de materia orgánica más joven y más lábil contenida en los macroagregados que en los microagregados (Elliott, 1988).

En el presente ensayo, se ha trabajado con muestras de suelo que se han procesado inicialmente con la finalidad de destruir los macroagregados pequeños y grandes con la intención de poder estudiar la dinámica de formación de nuevos macroagregados y de estabilización del C orgánico en los diferentes agregados, a partir de la incorporación de cenizas de madera al suelo que actúan básicamente como fertilizante mineral inorgánico.

- Dinámica de agregación y C orgánico asociado a los agregados.

Primero de todo cabe mencionar que en relación a la dinámica de agregación y el C orgánico asociado a los agregados se distinguen dos grupos de tratamientos, los cuales carecen de diferencias significativas entre ellos en la mayoría de casos; CC;C2 y C10;CN. Esto significa que la dosis más baja de cenizas aplicada (C2: cantidad equivalente de calcio en cenizas respecto al tratamiento B2) no tiene efectos significativamente diferentes en comparación con el tratamiento control.

Los resultados de este experimento a corto plazo, indican que existe un link entre el turnover de los macroagregados grandes (LMagg) y la dinámica de formación de los microagregados (magg).

La rápida formación de una gran cantidad de LMagg en los primeros 29 días de incubación, se dio tanto en los tres tipos de tratamiento con ceniza como en el tratamiento control. Aún sin disponer de datos en éstos primeros 29 días, se puede predecir que esta rápida formación de LMagg puede haberse visto influenciada por el aumento de la biomasa microbiana en los primeros 29 días de incubación, que ha crecido en condiciones controladas de laboratorio. No obstante, los resultados muestran una disminución en la cantidad de LMagg para todos los tratamientos a lo largo del periodo de incubación, e indican que el proceso de turnover de los LMagg puede haberse visto influenciado por las dosis de ceniza. Es muy probable que los tratamientos con mayores dosis hayan tenido más influencia en la actividad microbiana del suelo al haberse visto estimulada a causa de la mejora en las características químicas y físicas del suelo, a partir del aumento de la cantidad de macro y micronutrientes y de la relación C/N.

Esta tendencia de disminución de la fracción LMagg para los cuatro tipos de tratamiento, no se observa en la evolución de la concentración de C orgánico en los LMagg. Se observa un aumento muy pronunciado de la concentración de C orgánico en LMagg del día 29 al 44. Esto podría deberse a la presencia de microagregados dentro de los macroagregados grandes. Es posible que el primer día de fraccionamiento aún no se hubieran formado suficientes magg dentro de los LMagg; a medida que la cantidad de LMagg iba disminuyendo con el tiempo a causa de la descomposición de la MO promovida por la estimulación de la actividad microbiana, en el interior de los LMagg que aún restaban en el suelo sin romperse se estaban formando magg.

En relación a la formación de magg se observa una clara relación entre el turnover de los LMagg y la formación de magg. De nuevo, se observa en las gráficas que a más dosis de ceniza, más cantidad de magg en el suelo. Esto se podría deber a tres factores: (1) a medida que los LMagg van rompiéndose, se liberan los microagregados que se habían creado en su interior contribuyendo así a aumentar la proporción de magg en el suelo. (2) El papel del carbonato de calcio aportado por las cenizas en la floculación de las arcillas y la materia orgánica en agregados coloidales, puede tener un efecto directo en los mecanismos de formación y estabilización de los microagregados (Muneer y Oades 1989). (3) Ambas opciones.

En general es aceptado que el calcio es un elemento muy importante en la estabilización de las MOS en agregados a través de su rol en la formación de complejos arcilla-cación polivalente-MO (Oades 1989). Como el calcio ejerce su influencia a escala de complejación organo-mineral, su efecto estabilizador es principalmente observado en los microagregados pero también puede incrementar de forma indirecta la macroagregación a través de la actividad microbiana en suelos ácidos (Chan y Heenan, 1999 citado en Six et al., 2004).

Cabe destacar que la estabilidad de los magg (observada por un aumento en esta fracción para los cuatro tipos de tratamiento), parece estar relacionada con el contenido de C orgánico. Esto corrobora la teoría jerárquica de formación de agregados en la que los LMagg a medida que se han ido rompiendo, han liberado microagregados creados en su interior con menor concentración de C orgánico.

Otra observación de gran importancia es la alta concentración de C orgánico que presentan la fracción limo (silt), que de nuevo es superior en los tratamientos con dosis más altas de ceniza. Esta alta concentración se puede deber al efecto ya mencionado anteriormente de los carbonatos aportados por las cenizas que contribuyen a la agregación de las arcillas a la materia orgánica, confiriéndole estabilidad a las estructuras por la unión de complejos arcilla-catión polivalente-MO.

Así pues, se concluye que la dinámica de formación de macroagregados sigue el modelo jerárquico de agregación de suelo propuesto por Tisdall y Oades (1982) en el que se da una descomposición gradual de los macroagregados en microagregados (Oades y Waters, 1991), y un aumento en la concentración de C orgánico a medida que aumenta el tamaño de agregado. Este aumento de la concentración de C con el aumento de tamaño de agregado se da para las fracciones LMagg y Magg>magg. La excepción recae en la fracción silt, que se ha visto probablemente influenciada, tal y como hemos comentado anteriormente por la unión de complejos de arcilla-catión polivalente-MO.

- Stock de carbono en el suelo.

Tal y como se ha mencionado en relación al stock de carbono en el suelo, los tratamientos CC y C2 son los que almacenan más cantidad C orgánico en la fracción LMagg. Esto se debe a la menor rotura de los LMagg y consiguiente liberación de C orgánico en comparación a los tratamientos C10;CN. Una mayor proporción de LMagg, lleva consigo una menor proporción de magg. Este hecho presenta dos consecuencias: (1) una macroagregación mayor mejora la estructura del suelo y disminuye la densidad aparente, promoviendo la posibilidad de implantar cultivo, la resistencia a la erosión y el aumento de la infiltración de agua. Por otra parte el hecho de que se reduzca la cantidad de microagregados del suelo (2) puede aumentar las pérdidas de MO debido al aumento de la tasa de mineralización. El contenido de MOS más lábil y menos procesada en los macroagregados hace que éstos sean mucho más sensibles a las prácticas de gestión del suelo y estén menos protegidos de la actividad microbiana.

En relación a los tratamientos C10;CN se observa un mayor contenido de C orgánico retenido en magg y en silt en comparación con CC;C2. Se concluye pues, que la aplicación de cenizas tiene un efecto positivo en el potencial de secuestro de carbono en el suelo.

- Implicaciones de los resultados obtenidos en la estructura y capacidad potencial de secuestro de carbono del suelo.

Como hemos podido comprobar en el ensayo, la aplicación de cenizas de madera al suelo no aumentó la formación de macroagregados, sino más bien la disminuyó a lo largo de toda la incubación. Esta disminución en la cantidad de macroagregados observada en los tratamientos C10;CN podría acarrear una disminución de la calidad estructural del suelo, aunque probablemente esta disminución podría verse compensada por otras muchas propiedades que aportan consigo las cenizas de madera, tal y como la mejora del secuestro de C en el suelo con la consiguiente contribución a la fijación de CO₂ atmosférico, la aportación de macro y micronutrientes y como consecuencia, la estimulación de la actividad microbiana y mejora de la fertilidad. Además de todas estas propiedades, el efecto de encalado (valor neutralizante) que poseen las cenizas, es uno de los indicadores más importantes para evaluar el valor agrícola de las cenizas en suelos ácidos.

Así pues, según lo anteriormente expuesto, un suelo rico en macroagregados mejora la capacidad de infiltración de agua y movilidad de aire a través de este suelo. Los suelos, necesitan oxígeno tanto para la respiración de las raíces como para mantener la vida de los microbios aeróbicos, pero no obstante, demasiado oxígeno en el suelo podría resultar en una pérdida excesiva de C a causa de la mineralización del C orgánico por parte de los microbios aeróbicos.

Por lo tanto, una gestión adecuada del suelo, debería basarse en un equilibrio entre las prácticas que promuevan la mejora de la estructura y las que promuevan el secuestro de C orgánico del suelo, aunque dependiendo de las características propias de cada suelo, tal vez se haya de hacer más hincapié en uno u otro tipo de gestión.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que con la aplicación de cenizas, el modelo jerárquico de agregación de suelo propuesto por Tisdall y Oades (1982) se cumple para las fracciones de macroagregados grandes y pequeños y para los microagregados, pero no para la fracción limo. Además se han observado diferentes mecanismos de estabilización del C orgánico en los agregados: (1) a partir de la MOS que actúa como principal agente estabilizador (modelo jerárquico de Tisdall y Oades, 1982) y (2) a partir de agentes de unión inorgánicos; en este caso el Ca^{2+} , que forma complejos órgano-minerales de tamaño limo. Del mismo modo, se ha mostrado que la aplicación de cenizas al suelo reduce la accesibilidad a la materia orgánica por parte de los microorganismos a causa del aumento de la formación de microagregados estables permitiendo así el almacenamiento y estabilización del C orgánico en el suelo a la larga y mejorando la capacidad de secuestro de C en el suelo con la consiguiente contribución en la fijación de CO_2 atmosférico. No obstante, cabe señalar que la aplicación de cenizas no promueve la macroagregación y por lo tanto, esto podría acarrear una disminución de la calidad estructural del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- DEMEYER, A., VOUNDI NKANA J.C., VERLOO M.G., 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77. pp 287- 295
- ELLIOT, E.T., D.C. COLEMAN. 1988. Let the soil work for us. *Ecol. Bull.* 39, pp 1-10.
- OADES, J.M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. In: *Minerals in Soil Environments* (eds J. B. Dixon & S. B. Weed), Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 89–159.
- OADES, J.M., Waters, A.G., 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29, 815–828
- OHNO T., ERICH, M.S., 1990. Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient level. *Agric. Ecosyst. Environ.* 32, pp 223-239.
- OLIVER, W.W. 2000. Ecological research at the Blacks Mountain Experimental Forest in northeastern California. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-179. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- SILFVERBERG, K., HUIKARI, O. 1985. Wood-ash fertilization on drained peatlands. *Folia Forestalia* 633. pp 1-25.
- SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEFF, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79, pp 7-31
- SIX, J., ELLIOT, E.T., PAUSTIAN, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry* 32, pp 2099-2103.
- SOLLA-GULLÓN, F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., MERINO, A., 2001. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Invest.Agr.: Prod. Veg.* Vol. 16
- TISDALL, J.M., OADES, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33, 141-163.