

Efecto de las prácticas de repoblación forestal sobre el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de los agregados en el noreste de Argentina

A. M. Lupi^{1*}, M. Conti², R. Fernández³, D. Cosentino² y G. López⁴

¹ Instituto de Suelos. CIRN. INTA Castelar. Los Reseros y Las Cabañas, s/n. C.C. 25.
1712 Castelar (Buenos Aires). Argentina

² Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Avda. San Martín, 4453. 1417 Buenos Aires. Argentina

³ Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo. INTA. Avda. El Libertador, 2472. 3384 Montecarlo (Misiones).
Argentina. Facultad de Ciencias Forestales-UNAM. Eldorado (Misiones). Argentina

⁴ Centro de Investigación y Tecnología de ENCE. Ctra. Madrid-Huelva, km 630. 21080 Huelva. España

Resumen

Se evaluó el comportamiento del carbono orgánico, del carbono liviano y la estabilidad de los agregados ante la aplicación de diferentes alternativas de manejo de los restos de la corta final, de una plantación de *Pinus elliottii* E. Luego de 3 años y 5 meses de aplicados los tratamientos se comparó la extracción de los restos de la corta forestal, la quema y el laboreo, y la conservación de los mismos sobre el suelo. La extracción total, y la quema con laboreo provocaron una caída en el carbono orgánico del 20% y 37% en el espesor 0-5 cm y 5-15 cm respectivamente. La pérdida de carbono liviano fue del 35% en superficie y del 50% en subsuperficie. El diámetro medio ponderado de los agregados tamizado en húmedo fue afectado por la eliminación de la biomasa vegetal. Los agregados más pequeños se presentaron donde se aplicó la quema y el laboreo. El cambio en el diámetro de los agregados muestra un proceso de pérdida de la estructura que se asoció con la disminución del carbono orgánico y con el carbono liviano del suelo al aplicar prácticas intensivas de preparación del suelo.

Palabras clave: restos de corta, materia orgánica, estructura, *Pinus*, plantaciones subtropicales.

Abstract

Effect of the practices of forest establishment on the soil organic carbon and soil aggregate stability in the North-East of Argentina

This study evaluated the behaviour of organic carbon, labile carbon and aggregate stability under different residue management systems after harvesting of *Pinus elliottii* E. at the beginning of the second rotation. After 3 years and 5 month of applied the treatment was compared the following systems of site preparation: 1) extraction of forest residues, 2) burning and tillage, and 3) conservation of residues on the soil. The extraction of residues, and burns with disk caused a fall in the organic carbon soil OC of the 20% and 37% in the 0-5 cm and 5-15 cm layer. The loss of light carbon was of the 35% in surface and of the 50% in subsurface. The aggregate mean weight diameter wet sieving was affected by residue extraction. The smaller aggregates were found following the application of burning and tillage practices. The change in aggregate diameter indicated a marked process of loss of the structure associated with the decrease of the organic carbon and with the light carbon to apply intensive practices of site.

Key words: harvest residue, organic matter, aggregate stability, *Pinus*, subtropical plantations.

Introducción

En regiones (sub)tropicales, el uso del fuego para la quema de la biomasa vegetal es una de las herramientas más empleadas dentro de las tareas de la sel-

vicultura de establecimiento en plantaciones de rápido crecimiento. Se indica que este tipo de prácticas puede tener un efecto positivo sobre el crecimiento inicial de las plantaciones (Raison, 1979), pero simultáneamente hay un consenso sobre el efecto adverso que puede ser inducido al suelo (Almendros *et al.*, 1990; García-Oliva *et al.*, 1999; Neary *et al.*, 1999).

* Autor para la correspondencia: amlupi@cirn.inta.gov.ar
Recibido: 02-11-06; Aceptado: 27-07-07.

Esto ha llevado a que en la última década se indague en dos aspectos fundamentales y necesarios para predecir escenarios futuros y definir estrategias de manejo: 1) conocer la magnitud de los cambios producidos en el ambiente edáficos y en el crecimiento por la aplicación de planteos de manejo intensivos y, 2) desarrollar prácticas alternativas sostenibles en el largo plazo.

La quema de los restos de la corta y el laboreo puede concluir en un proceso de degradación física, química y biológica. El fuego, además de disminuir los aportes de materia orgánica (MO) fresca, consumir el humus del suelo y aumentar la tasa de mineralización del N (Giardina y Rhoades, 2001), puede alterar la disponibilidad potencial de nutrientes por lixiviación o por volatilización (Raison, 1979), y cambiar la distribución, composición y actividad biológica (Marshall, 2000). La caída en los niveles de MO usualmente se verifica en primera instancia por la pérdida de la fracción menos protegida y más asociada a la disponibilidad de nutrientes (Gregorich *et al.*, 1995; Gregorich y Janzen, 1996). La perturbación periódica de la estructura del suelo con el laboreo puede aumentar la tasa de mineralización del carbono orgánico (CO) por la exposición de la MO físicamente protegida (Balesdent *et al.*, 2000), lo que usualmente conduce a una disminución en la estabilidad de los agregados (Tisdall y Oades, 1980). En contraposición, la conservación de residuos y el no laboreo pueden mitigar el impacto negativo que causan los sistemas intensivos; mejorando las características químicas, físicas y biológicas debido al efecto de protección que ejercen los residuos sobre el suelo y por los aumentos en los niveles de CO lábil y estable que éstos propician (Cambardella y Elliott, 1992, 1993; Chenú *et al.*, 2000). La identificación de la fracción de la MO más sensible ayudaría a dilucidar cambios y trayectorias de los compartimentos del CO, lo cual puede servir como instrumento de comprobación en el marco del Protocolo de Kyoto (Leifeld y Kögel-Knabner, 2005).

La provincia de Misiones, Argentina, con una superficie total de 3.000.000 ha sustenta su actividad económica en el sector foresto-industrial. Cuenta con 200.000 has de bosques implantados con *Pinus taeda* L. y *P. elliottii* E. lo cual representa el 55% de la superficie de los bosques cultivados con *Pinus* del país (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, 1999). Las plantaciones de la primer rotación se realizaron en sitios de alta productividad (Fernández *et al.*, 1999) acompañados de

técnicas de repoblación intensivas. En la última década se dio inicio al segundo ciclo forestal en estos suelos (Ultisoles y Alfisoles) que naturalmente se caracterizan por su baja fertilidad (Gonçalves *et al.*, 1997). La continuidad en la aplicación de las quemas como técnica de repoblación en estos suelos produciría un impacto significativo en la estabilidad nutritiva de las futuras plantaciones (Goya *et al.*, 2003)

En este marco, y ante la necesidad de sostener las elevadas tasas de crecimiento obtenidas con el desarrollo genético, es necesario desarrollar técnicas que permitan mantener la capacidad productiva de estos suelos y expresar el potencial de crecimiento del cultivo.

Se plantea la siguiente hipótesis: la implementación de sistemas de manejo con conservación de restos de la corta mejora el balance del carbono y el estado de agregación del suelo, lo cual se verifica por un aumento en la concentración de CO, aumento en el CO de la fracción liviana y una mayor estabilidad de los agregados del suelo. El objetivo de este trabajo fue estudiar las alteraciones que se manifiestan, antes del cierre del dosel, en el carbono orgánico, en el carbono liviano y en el tamaño de los agregados cuando se aplican diferentes sistemas de manejo de los restos de la corta forestal al inicio del segundo ciclo.

Material y Métodos

Descripción del sitio

El estudio se desarrolló en el NO de la provincia de Misiones, Argentina; (25° 57' latitud Sur y 54° 27' de longitud Oeste; Fig. 1). El suelo es un *Kandiudult* (Soil Survey Staff, 1994), localmente llamado rojo profundo dado que presenta más de 2 metros de profundidad efectiva y bien drenado. Son suelos derivados del basalto, con arcillas del tipo de las caolinitas y óxidos de Fe y Al (> 65% de arcilla en todo el perfil). La secuencia de horizontes característica de estos suelos es: A, AB, B₁₁, B₁₂, BC, C.

El experimento se encuentra ubicado en un ambiente donde el relieve es suave a ondulado (3% de pendiente), elevado a unos 200 msnm.

El clima fue clasificado como Cfa en el sistema de Köppen, es subtropical húmedo con precipitaciones que oscilan desde 1.900-2.100 mm sin mostrar diferencias en su distribución a lo largo del año. La temperatura media anual es de alrededor de 20°C y la amplitud térmica media anual es de 11°C.



Figura 1. Localización relativa del ensayo en la provincia de Misiones y de ésta en la República Argentina.

La vegetación natural es la selva subtropical compuesta principalmente por árboles que ocupan diferentes estratos entre los cuales se encuentran: *Cedrela fisilis*, *Balfourodendron riedelianun*, *Ocotea acutifolia*, *Cabrlea oblonguifolia*, *Ingá afinis* (Cabrera, 1976).

En el año 1971 se eliminó el bosque nativo y se estableció una plantación de *Pinus elliottii* Engelm, que en febrero de 1996 alcanzó la edad de corta final (Fig. 2). Los restos de la cosecha fueron distribuidos sobre el terreno y permanecieron durante 6 meses con el suelo en descanso.

En julio de 1996 se realizó un muestreo de residuos en parcela de 480 m² tomando 12 muestras de una superficie de 0,78 m². Los residuos fueron clasificados en dos clases de tamaño: (i) finos: mantillo, hojas y ramas con diámetro inferior a 1 cm; y (ii) gruesos: conos, ramas y pequeños fustes menores a 15 cm de diámetro. Luego de tomar el peso húmedo a campo, una

submuestra de cada clase fue llevada a estufa (70°C; ≈ 72 hs) para determinar el porcentaje de humedad y estimar la cantidad de materia seca por hectárea. También, de una muestra compuesta de cada clase se determinó la concentración de N, P y K.

En julio de 1996 se realizó un muestreo de suelos en todo el ambiente tomando una muestra compuesta del espesor 0-10 cm. En agosto se pasó un rolo de 2 Mg, con la finalidad de quebrar y aplastar los restos de la corta para favorecer el contacto con el suelo.

Tratamientos

Los tratamientos que se evalúan en este estudio fueron implementados a fines de agosto de 1996 bajo un diseño en bloques completos al azar con 4 repeticiones. Estos comprenden las siguientes modalidades de manejo de los restos de la cosecha:

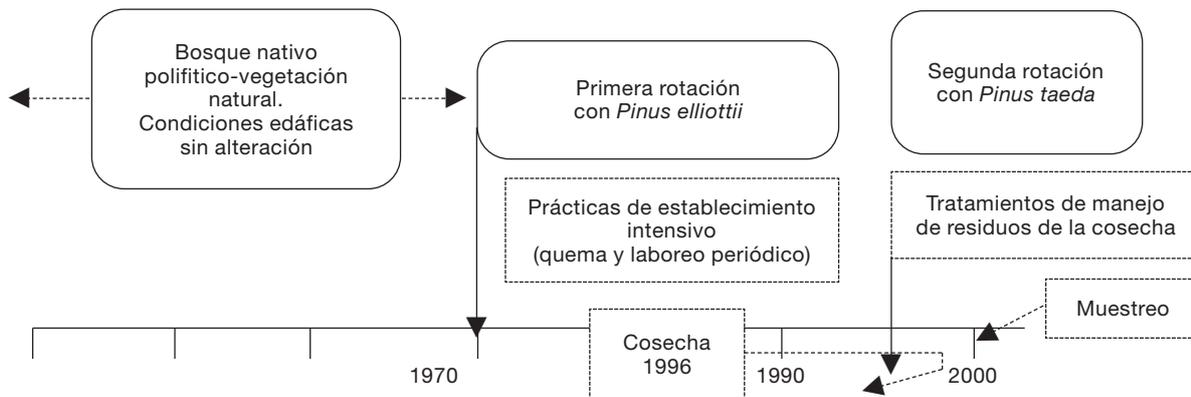


Figura 2. Representación del uso del suelo en el sitio del experimento, en una escala temporal.

1. *Extracción manual (ER)*: los restos de la cosecha forestal y el mantillo del *Pinus elliottii* antecesor se extrajeron en su totalidad. El suelo permaneció desnudo.

2. *Preparación intensiva de sitio (PI) o sistema tradicional*: se procedió a la quema de los restos de la cosecha y del mantillo; luego, se procedió al laboreo con una rastra liviana hasta los 15 cm de profundidad. Si bien no se cuenta con los registros de la temperatura de la quema, en general las que se aplican en esta región para la reducción de los restos de la cosecha en bosques implantados son calificadas en el rango de intensidad leve a moderada. Dada la heterogeneidad de la quema, luego de su aplicación se elaboró un mapa identificando claramente las áreas con quema y laboreo.

3. *Preparación cero de sitio (PC)*: los restos de la cosecha fueron mantenidos sobre el suelo, sin recibir ningún tipo de laboreo.

En septiembre se procedió a la plantación con *Pinus taeda* Engelm. y el suelo no recibió ningún tipo de fertilizante ni enmienda. El control de malezas se realizó con herbicidas hasta finales del primer año.

Muestreo de suelo

En enero del año 2000 (a los 3 años y 5 meses de la cosecha) se tomaron 6 muestras simples para conformar una muestra compuesta por parcela de 480 m². El mapeo realizado en el tratamiento PI permitió que las muestras fueran obtenidas al azar en los sectores quemados.

Las muestras fueron tomadas de los espesores 0-5 cm y 5-15 cm, se secaron al aire y fueron pasadas por tamices de 0,25 mm de abertura, tratando de controlar el paso de restos de carbón que pudiera presentar PI. A efectos comparativos se tomaron muestras de suelo con vegetación nativa que se encuentra próximo al experimento, bajo similar condición edáfica y topográfica. Para esto se establecieron 4 parcelas de similar superficie. Esta situación no fue incluida en el análisis estadístico ya que no fue un tratamiento aleatorizado.

Para la determinación del carbono orgánico fácilmente oxidable (CO) se utilizó la metodología de Walkley-Black (1934). La fracción liviana del carbono (CL) se separó según la metodología propuesta por Richter *et al.* (1975) ajustada en el Laboratorio de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Buenos Aires (Arg.). Para esto se tomaron 500 mg de suelo tamizado y se le adicionaron 6-7 ml de bromoformo-etanol (δ : 2 g cm⁻¹), la que posteriormente fue agitada manualmente para resuspender la muestra. Luego de

centrifugar durante 2 minutos a 1.000 rpm y de separar la fracción del carbono sobrenadante, se le agregó a esta 1,5 ml de Cr₂O₇K₂ 1N y 3 ml de SO₄H₂. La nueva mezcla se agitó y se dejó reposar en heladera durante 20 minutos. La titulación se realizó por Walkley-Black (1934).

La determinación del tamaño de los agregados según De Leehneer y De Boodt (1959) se realizó en el Laboratorio de la Cátedra de Manejo de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Naciones del Nordeste, provincia de Corrientes (Arg.). Se tomaron 4 muestras por parcela de los primeros 5 cm del perfil, se secaron al aire y luego se separaron los agregados de acuerdo a su plano de ruptura pasando primeramente por el tamiz de 8 mm. Luego fueron dispuestas sobre un juego de tamices con abertura de malla de 4,76 mm; 3,36 mm y 2 mm, los cuales fueron sometidos a 3.000 vibraciones por minuto con oscilaciones de 2 mm. Luego de cinco minutos de tamizado cada fracción fue pesada y se calculó el diámetro del peso medio (DMPS). Las Fracciones de 8-4,76 mm; 4,76-3,36 mm; 3,36-2,68 mm fueron humedecidas desde una bureta hasta capacidad de campo e incubadas por 24 h. Esto aseguró el humedecimiento de la muestra de manera lenta y homogénea evitándose los cambios bruscos de humedad y posibles ruptura de agregados. Nuevamente los agregados fueron tamizados durante 5 minutos, utilizando un agitador ascendente y descendente. Los agregados remanentes en cada tamiz (8-4,76 mm; 4,76-3,36 mm; 3,36-2 mm 0,84 mm; 0,5 mm y 0,3 mm) fueron secados en estufa a 105°C hasta peso constante. Se determinó el diámetro de peso medio (DMP, mm) de los agregados para el tamizado en agua y por diferencia entre ambos se determinó el cambio en él (CDMP, mm). El DMP se calculó según:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

donde i es cada fracción de agregados, n es el número total de fracciones de agregados incluyendo la que pasa a través del tamiz más fino, x_i es el diámetro promedio de cada fracción i (mm), calculado como la media aritmética de la apertura de malla de dos tamices consecutivos y w_i es la proporción del peso de cada fracción i respecto de la muestra total tamizada (g g⁻¹).

Análisis estadístico

Para comprobar el efecto de los tratamientos sobre las variables respuesta (CO, CL y DMPS, DMPH) se apli-

có mediante análisis de varianza con el paquete estadístico R (Development Core Team R., 2003), bajo un modelo en bloques completos al azar según se describe:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

donde y_{ijk} es la variable respuesta correspondiente al i -ésimo valor del tratamiento en el k -ésimo bloque o repetición; μ es la media general de la variable respuesta; τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento; β_j es el efecto del j -ésimo bloque y ε_{ijk} es el error aleatorio. Cuando el análisis de varianza mostró diferencias significativas, las medias fueron comparadas a través de la prueba de Tukey ($P=0,05$). Para explicar la relación de CO, CL con el DMP se ajustaron modelos de regresión lineal entre ambas variables.

Resultados y Discusión

Caracterización de la condición de inicio

Al establecer el experimento el espesor 0-10 cm del suelo presentaba un nivel de CO del 2% (Walkey-Black, 1934), 0,19% de N total (Kjeldahl), el pH(H₂O) era de 5,8 y la CIC efectiva era de 12 cmol_c kg⁻¹.

La cantidad de materia seca existente sobre el suelo luego de la corta final, fue de 40 Mg.ha⁻¹ de la cual, el 50% aproximadamente incluyó el material clasificado como fino y el 50% restante incluyó material de características leñosas. La adición de los restos de la cosecha al mantillo significa el retorno de una importante cantidad de materia seca que constituye el sustrato de la descomposición que reincorpora MO y nutrientes al suelo (Goya *et al.*, 2003). Si asumimos que el 50% de la biomasa aportada es carbono, entonces, la conservación de los restos de cosecha (o la eliminación por extracción y quema) significó un aporte (o pérdida) de ≈ 20 Mg.ha⁻¹. La cantidad de restos de cosecha de *P. elliottii* estimada en nuestro estudio fue inferior a la reportada por Robertson (1998) para *P. radiata* (60 Mg.ha⁻¹) y *P. contorta* (79 Mg.ha⁻¹).

La cantidad de nutrientes en los restos de cosecha de nuestro experimento alcanzó los 297 Kg N.ha⁻¹, 195 kg K.ha⁻¹ y 43 Kg P.ha⁻¹. La aplicación del fuego durante la repoblación facilita las tareas de plantación y post-plantación, sin embargo puede ocasionar importantes pérdidas de N por volatilización, aún en quemas de intensidad leve y moderada (Raison *et al.*, 1993) alcanzando valores de 3-6 kg N.Mg⁻¹ de combustible (Carter y Foster, 2004). Es posible que algunos nu-

trientes no sean perdidos por volatilización dado que requieren temperaturas de quemas intensas; sin embargo, en estos ambientes con elevado régimen hídrico, la acumulación de cenizas en períodos sin vegetación podría provocar la salida de nutrientes por lixiviación.

Carbono orgánico (CO) y carbono liviano (CL)

A los 3 años y 5 meses de la cosecha, la concentración de CO fue modificada significativamente ($P < 0,05$) por el sistema de preparación del terreno aplicado (Fig. 3). En el espesor 0-5 cm los niveles oscilaron entre 2,3 a 2,8% (cv: 16%) mientras que en la capa 5-15 cm la variación fue desde 1,5% hasta 3,2% (cv: 26%). En ambas profundidades el CO de los tratamientos sin restos de corta (PI y ER) fue más bajo que el tratamiento con restos en superficie (PC). Las pérdidas fueron del 17% (PI) y 22% (ER) en el espesor 0-5 cm y del 38% (PI) y 37% (ER) en el espesor 5-15 cm. La ausencia de aportes orgánicos en combinación con la brusca exposición del suelo luego de la cosecha y la posterior preparación del terreno, pudo acelerar los procesos de descomposición, responsables de la pérdida del C del suelo (Lugo *et al.*, 1986; Khanna y Ulrich, 1991; Worrell y Hampson, 1997).

La similitud estadística entre ER y PI podría sugerir que la caída del CO del suelo fue principalmente afectada por la ausencia de aportes de MO fresca, más

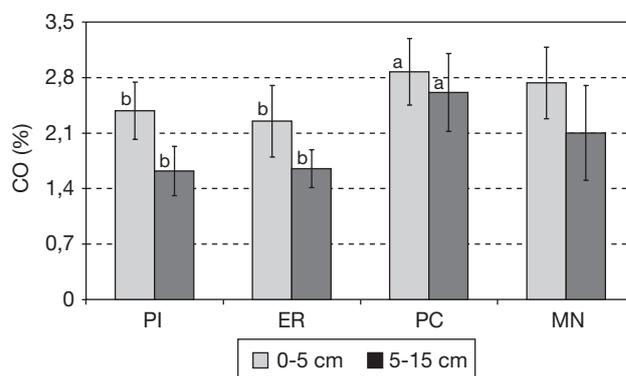


Figura 3. Concentración de carbono orgánico en el espesor 0-5 cm y 5-15 cm en un suelo con diferentes sistemas de manejo de restos de la cosecha forestales y en un bosque nativo. Las barras indican la desviación típica. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. PI: preparación intensiva. ER: extracción de restos de la corta forestal y del mantillo. PC: conservación de restos de la corta. MN: monte nativo.

que el método empleado para su eliminación. Es de suponer que la continua oxidación del CO nativo en estos tratamientos excedió los ingresos que podrían generarse por transformación de raíces del cultivo anterior y las malezas que se desarrollaron en el sitio (Rasmussen y Parton, 1994). Estos resultados remarcan la necesidad del aporte continuo y/o la conservación del material vegetal para mantener los niveles de CO, sobre todo en ambientes tropicales, debido a la baja estabilidad que presenta la MO en estos ambientes (Shang y Tiessen, 1997).

La concentración de CO en el tratamiento PC fue un 5% mayor al ecosistema con vegetación natural (MN); este aumento estaría dado por la deposición superficial de los residuos que favorecería al incremento del CO en los primeros centímetros de suelo. Este comportamiento podría sugerir que de haber existido alguna pérdida de CO durante la eliminación del bosque natural y las tareas de la primera rotación, esta fue compensada en el corto plazo mediante la conservación de los restos de la corta del *Pinus* del primer ciclo forestal. Cuando se aplican estos sistemas de manejo conservacionistas el proceso de incorporación de la MO por los microorganismos se realiza de manera uniforme debido a la ausencia de remoción del suelo (Gregorich y Janzen, 1996). Lugo *et al.* (1986) también demostraron que el contenido de CO de suelos (sub)tropicales puede ser recuperado de manera relativamente rápida si se reduce el laboreo del suelo.

Las fracciones de la MO con tiempos de reciclados de pocos años, como el CL, a menudo responden más rápidamente que el CO asociado a la fracción mineral (Cambardella y Elliott, 1992; Six *et al.*, 1998). El CL es una fracción de la MO que se encuentra en un estado de transformación intermedio entre los restos frescos y la MO estable. El aumento o la disminución de los aportes orgánicos normalmente se asocian a un incremento o caída en los niveles de CL (Gregorich y Janzen, 1996).

La Tabla 1 muestra que la concentración de CL fue afectada notablemente ($P < 0,001$) según el manejo que recibieron los restos de la corta. En concordancia con lo observado para el CO los tratamientos sin restos orgánicos (PI y ER) presentaron una concentración de CL significativamente más baja al tratamiento con restos de corta en superficie. En la capa 0-5 cm de PI la concentración de CL descendió el 37% y en ER el 33%. En el espesor subsuperficial las diferencias fueron más acentuadas; alcanzaron al 59% en PI y del 42% en ER. PC mostró niveles de CL similares en ambos espeso-

Tabla 1. Concentración de carbono liviano (%) en el espesor 0-5 cm y 5-15 cm en un suelo con diferentes sistemas de manejo de residuos forestales y en un bosque nativo

	0-5 cm	5-15 cm
PI	0,46 (0,15) b	0,27 (0,15) b
ER	0,48 (0,16) b	0,39 (0,21) b
PC	0,73 (0,12) a	0,68 (0,09) a
MN	0,67 (0,07)	0,61 (0,10)

Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. Los valores entre paréntesis indican desviación típica de la muestra. PI: preparación intensiva. ER: extracción de restos de la cosecha y del mantillo. PC: conservación de restos de la cosecha. MN: monte nativo.

res y comparables a la situación sin perturbación (Tabla 1). N'dayegamiye y Anger, (1993), reportan aumentos en el CL del orden del 60% en tratamientos en que se agregaron 25 y 50 Mg ha⁻¹ de residuos leñosos cuando se los comparó con un tratamiento control sin el agregado de residuos.

En coincidencia con Jansen *et al.* (1992) y McLauchlan y Hobbie (2004), en nuestro estudio se encontró una asociación significativa entre el CL y el CO ($r = 0,885$; $P < 0,05$) (Fig. 4), pudiendo de esta manera tomarse al CL como un indicador temprano de los efectos del manejo, sobre el contenido y la composición del CO.

Los tratamientos no alteraron de manera significativa ($P > 0,05$) la proporción CL/CO (Tabla 2). En PC esta relación fue en promedio 25,5%; levemente superior a MN. Esta relación presentó su valor más bajo en PI; y un comportamiento intermedio en ER.

Comparando estos dos últimos tratamientos se desprende que el causante de la caída del CL no sería solamente la eliminación de los restos de la cosecha y el

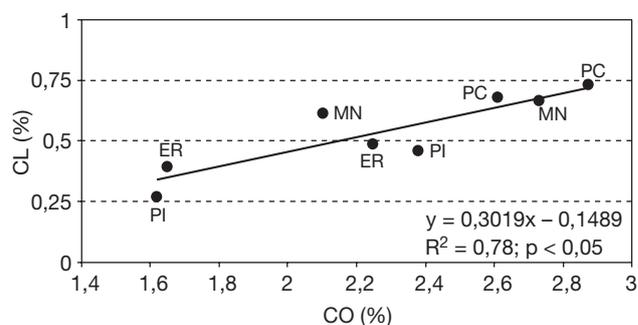


Figura 4. Relación entre el carbono liviano y el carbono orgánico en el espesor 0-5 cm y 5-15 cm, con diferentes sistemas de manejo de restos de la corta forestal.

Tabla 2. Proporción CL/CO en el espesor 0-5 cm y 5-15 cm en un suelo con diferentes sistemas de manejo de residuos forestales y en un bosque nativo

	0-5 cm	5-15 cm
PI	19% a	17% a
ER	21% a	26% a
PC	25% a	26% a
MN	24%	23%

Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. PI: preparación intensiva. ER: extracción de los restos de la corta forestal y del mantillo. PC: conservación de los restos de la cosecha. MN: monte nativo.

mantillo sino el efecto asociado de la quema y el laboreo. El efecto negativo *potencial* de PI se hace más evidente si se toma en consideración que el nivel de CO representa el 44% del encontrado en MN; en cambio en ER, el CO alcanza al 64%. Es probable que, a pesar del retiro de los restos orgánicos, la ausencia de laboreo haya contribuido a conservar el CL ante la no interrupción de los agregados. Los agentes agregantes de naturaleza transitoria no son expuestos a la descomposición de los microorganismos

La proporción CL/CO en MN fue similar en ambas profundidades analizadas y comparables a las citadas por Duxbury *et al.* (1989) para ambientes con vegetación nativa de regiones tropicales y subtropicales, donde los procesos de transformación de la MO son varias veces más rápidos que en regiones templadas.

Diámetro medio ponderado de los agregados (DMP)

El DMP de los agregados tamizados en seco no acusó cambios ($P > 0,05$) con los tratamientos, mostrando valores singularmente homogéneos (Fig. 5). A pesar de ello se observó que este parámetro presentó un grado de asociación relativamente elevado tanto con el CL ($r = 0,75$; $P < 0,05$) como con el CO ($r = 0,65$; $P < 0,05$). El alto grado de estructuración natural de estos suelos y la homogeneidad en los valores de DMPS puede ser atribuido a la presencia de Al y Fe, que tienen una gran influencia sobre la estabilidad intrínseca de los agregados (Oades, 1993; Muggler *et al.*, 1999). En estudio mineralógico realizado por Rojas (1997) en suelos similares de la región indica que los agregados se encuentran constituidos por partículas de caolinita estabilizadas por óxidos de Fe.

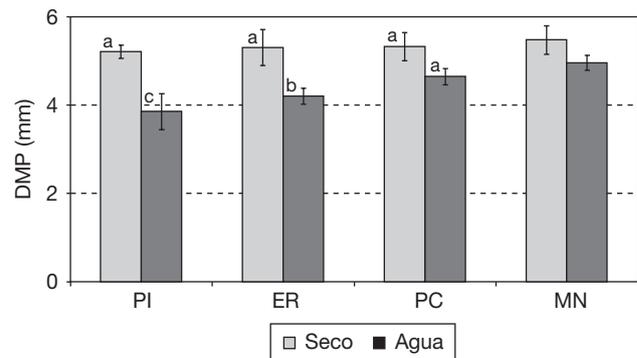


Figura 5. Diámetro medio ponderado de los agregados luego del tamizado en seco y del tamizado en agua, en el espesor 0-5 cm, en diferentes sistemas de manejo de restos de la cosecha forestal y con bosque nativo. Las barras indican la desviación típica. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. PI: preparación intensiva. ER: extracción de los restos de la corta forestal y del mantillo. PC: conservación de los restos de la corta. MN: monte nativo.

Contrariamente, los tratamientos afectaron considerablemente ($P < 0,05$) el DMP de los agregados tamizados en húmedo, el cual se asoció de manera importante con las caídas en el CO ($r = 0,80$; $P < 0,05$) y el CL ($r = 0,91$; $P < 0,05$).

El tamizado en húmedo puso en evidencia las diferencias ocasionadas por los métodos de eliminación de los restos de la corta, lo cual no fue observado al analizar el CL y el CO. La quema y el laboreo provocaron cambios más importantes en la calidad física del suelo (Fig. 5). Tanto en PI como en ER, la pérdida de estabilidad de los agregados en agua se evidenció mediante una redistribución del suelo, con menor proporción en las fracciones de agregados de tamaño mayor y acumulación de agregados en las fracciones menores (Fig. 6).

Independientemente del tamizado (seco o húmedo), el tamaño de los agregados de nuestro trabajo es algo más grande que los mencionados por Rojas (1997) al analizar los agregados de un Ultisol bien estructurado del sur de la provincia de Misiones (Arg.).

El tratamiento PC concentra proporciones de agregados significativamente más altas ($P < 0,05$) a PI en la fracción de 6,38 mm y 4,06 mm, indicando que las uniones orgánicas desarrolladas ante la presencia de residuos fueron suficientemente estables a la acción del agua.

La fracción de 2,68 mm mostró proporciones de suelo muy similares, sin ser afectados por los tratamientos. Esto indicaría, en concordancia con lo mencionado previamente, que las fracciones de agregados

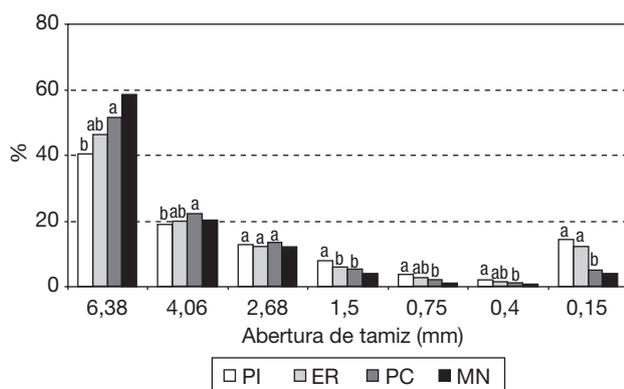


Figura 6. Fracciones de agregados obtenidas por tamizado en agua en el espesor 0-5 cm de diferentes sistemas de manejo de restos de la cosecha y en un bosque nativo. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. PI: preparación intensiva. ER: extracción de los restos de la cosecha. PC: conservación de los restos de la cosecha. MN: monte nativo.

mayores de los tratamientos PI y ER rompieron e incrementaron las fracciones 1,5; 0,75; 0,4 y <0,15 mm

A partir de la fracción de 1,5 mm hasta 0,4 mm se presenta un patrón de acumulación decreciente desde PI > ER > PC. Para todos los tratamientos, en las fracciones de 0,75 y 0,4 mm se acumula menos del 3% del suelo proveniente de las fracciones mayores. La escasa acumulación de suelo en los tamices de 0,75 mm y 0,4 mm no fue una característica particular de los tratamientos más agresivos, por el contrario, resultaría un atributo del suelo ya que el mismo patrón se acentúa en PC y MN.

Resulta interesante rescatar que una gran parte del suelo se concentra en la fracción de 0,15 mm, donde los tratamientos PI y ER duplicaron o triplicaron lo encontrado en PC. Estos resultados sugieren que la quema y el laboreo favorecieron la pérdida de las uniones entre macroagregados, efecto que no fue de tal magnitud en ER a pesar de la eliminación de los restos de la corta.

Para demostrar la redistribución del tamaño de agregados que producen los sistemas de manejo agresivos, se agruparon las fracciones de suelo mayores a 6,38 mm, la de 4,06 mm y menores a 2,68 mm. El fuego y el laboreo (PI), y la eliminación de los aportes de la corta (ER) afectaron principalmente a los agregados mayores hasta acumularlos en las fracciones menores a 2,68 mm, donde la proporción de suelo osciló entre el 30-40% del total. Por su lado, PC y MN contuvieron más del 70% de suelo en las fracciones mayores a 4,06 mm. El tratamiento PC mostró un comportamiento similar al testigo con vegetación nativa.

La acumulación de suelo en las fracciones menores a 1,5 mm puede estar relacionada a la acción de ligantes persistentes como sustancias húmicas de naturaleza aromática con Fe amorfo, aluminio y aluminosilicatos (Tisdall y Oades, 1982). Estos estabilizantes de naturaleza persistentes pueden conformar los complejos arcilla-metales polivalentes, materia orgánica (A-M-MO) que se unen en unidades mayores del tipo $[(A-M-MO)_x]_n$ para conformar microagregados, como los indican Edwards y Bremner (1967).

Si bien en este estudio no se trabajó con fracciones menores a 0,15 mm, Rojas (1997) también reporta una acumulación de agregados entre 1.000 y 150 μ m y escasa cantidad de suelo en las fracciones menores de 115 μ m hasta las inferiores a 53 μ m. Este autor atribuyó este comportamiento al alto contenido de Fe libre y de arcillas que limitan la destrucción por el laboreo.

Resultados comparables a lo sucedido en PC también fueron informados por Piccolo (1996), trabajando en el mismo sitio que Rojas. Piccolo, al estudiar el efecto de los abonos verdes sobre la MO y los agregados destaca la acumulación de suelo en el tratamiento que incluye el laboreo continuo del suelo (comparable a PI en nuestro estudio).

En contraposición, N'dayegamiye y Angers (1993) indican que luego de 9 años de aplicar cantidades crecientes de residuos leñosos (25 y 50 Mg ha⁻¹) no se observó un incremento en la estabilidad de los macroagregados mayores a 250 μ . Estos autores atribuyeron este comportamiento a la pérdida de agentes de agregación temporarios y transitorios, que desaparecen rápidamente dado que representan una fuente de CO fácilmente metabolizable. Debido a que la evaluación realizada por los autores fue a los 9 años de adicionados los residuos, es probable que el efecto de estos agentes aun esté presente en nuestro estudio.

El cálculo del CDMA mostró que la conservación de los restos de la corta formó agregados más estables ($P < 0,01$) en relación a PI y ER (Fig. 7). La eliminación de los restos orgánicos condujo a un proceso de desestabilización (mayor CDMA) que se acentuó con la quema y el laboreo. El valor del CDMA en PI y en ER es más del doble del reportado para el ambiente con vegetación nativa (MN). La pérdida de estabilidad de los agregados estuvo fuertemente asociada con la disminución del CO ($r = -0,85$; $P < 0,05$) y de manera particular con la fracción liviana ($r = -0,94$; $P < 0,05$) responsable de la formación y estabilización de los macroagregados. Los resultados evidencian que estos suelos naturalmente bien estructurados (Gonçalves *et al.*,

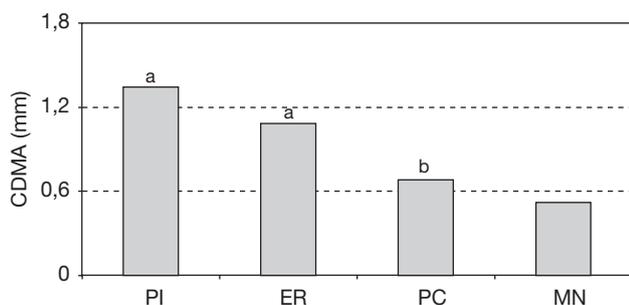


Figura 7. Cambio en el diámetro medio de los agregados (CDMA), en el espesor 0-5 cm de diferentes sistemas de manejo de residuos y con bosque nativo. Letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significación del 0,05 mediante test de Tukey. PI: preparación intensiva. ER: extracción de los restos de la cosecha. PC: conservación de los restos de la cosecha. MN: monte nativo.

1997), pueden ingresar en un acelerado proceso de degradación física como consecuencia de la pérdida de MO que ocasionan la aplicación de una selvicultura intensiva.

Conclusiones

Bajo las condiciones del experimento se observó que en el corto plazo (a los 3 años y 5 meses de la cosecha) el sistema de repoblación forestal afecta la cantidad y calidad del carbono del suelo y la estabilidad de los agregados. La eliminación de los restos de la corta, ya sea por la exportación de la biomasa vegetal remanente o por el uso del fuego y el laboreo, provocaron una pérdida del carbono edáfico. Estas fueron más acentuadas en la fracción liviana, evidenciándose la mayor sensibilidad de este parámetro a las prácticas de manejo.

Las pérdidas de CL y CO estuvieron acompañadas por una degradación en las condiciones físicas del suelo, comprobadas por una disminución acentuada en el DMPH y en el CDMA.

Si bien la forma en que se eliminaron los restos de la corta no se tradujo en diferencias estadísticas en los compuestos orgánicos carbonados de los tratamientos PI y ER, si las hubo cuando se analizaron el DMPH y el CDMA. Este comportamiento hace que estos parámetros físicos se transformen en indicadores más sensibles a los cambios en la calidad del suelo.

PI fue una práctica aplicada comúnmente en el primer ciclo forestal y los es aún en el segundo ciclo bajo determinadas situaciones. El análisis del impacto negativo de PI no se reduce solo a su efecto sobre el

suelo, sino también al sistema general debido a la liberación de CO₂ a la atmósfera, producto de la quema de los residuos y de la oxidación de la MO.

En ambientes subtropicales, la conservación de la MO es un factor clave para mantener la productividad de los suelos. Si se considera la longitud de un ciclo forestal con *Pinus* en esta región es factible suponer que a partir del cierre del dosel y la consecuente formación del nuevo mantillo podrán aumentarse los niveles de MO.

El uso de sistemas conservacionistas resulta una opción viable desde el punto de vista económico y ecológico. La conservación de los restos vegetales en superficie y el no laboreo produjo un impacto positivo en el sistema, presentando mayores niveles de CO y CL. Esto también fue acompañado por la formación de agregados estables. PC puede ser una alternativa para la reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera ante la eliminación del laboreo del suelo y la reducción de la quema de combustibles fósiles o bien, para secuestrar carbono atmosférico en estructuras orgánicas estables asociadas con la fracción mineral del suelo.

Agradecimientos

A la Empresa Alto Paraná por permitir la instalación del experimento en sus plantaciones. Al proyecto forestal de desarrollo SAGPyA-BIRF por la financiación parcial del estudio. Al Ing. Rubén Godagnone del Instituto de Suelos INTA Castelar por su colaboración en la clasificación taxonómica del suelo. Al Ing. Agr. Crispin Venialgo por las determinaciones físicas y al Sr Eduardo Vela por las determinaciones químicas.

Referencias bibliográficas

- ALMENDROS G., GONZALES-VILA F.J., MARTÍN F., 1990. Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest: an experimental approach to the effects of fire on humic substances. *Soil Science* 149, 158-168.
- BALESDENT J., CHENU C., BALABANE M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res* 53, 215-230.
- CABRERA A.L., 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 2.^a ed. Tomo II, Fascículo 1, ACME, 85 pp.
- CAMBARDELLA C.A., ELLIOTT E.T., 1992. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci Soc Am J* 56, 777-783.

- CAMBARDELLA C.A., ELLIOTT E.T., 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56, 449-457.
- CARTER M.C., FOSTER C.D., 2004. Prescribed burning and productivity in southern pine: a review. *Forest Ecology and Management* 191, 93-109.
- CHENU C., BISSONNAIS L.E., ARROUAYS D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society American Journal* 64, 1479-1486.
- DEVELOPMENT CORE TEAM R., 2003. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org>.
- DE LEENHEER L., DE BOODT M., 1959. Determination of agrégate stability by the change in mean weight diameter. Proceedings of the International Symposium on Soil Structure; Medelingen van de Landbouwhogeschool: Ghent, Belgie. pp. 290-300.
- DUXUBY J.M., SMITH M.S., DORAN J.W., 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. En: Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G., eds. Cap 2. Honolulu, Hawaii. pp 33-67.
- EDWARDS A.P., BREMMER J.M., 1967. Microaggregates in soil. *J of Soil Sci* 18(1), 64-73.
- FERNÁNDEZ R.A., LUPI A.M., PAHR N., 1999. Aptitud de las tierras para la implantación de bosques. Provincia de Misiones. *Yvyrareta* 9, 41-49.
- GARCÍA-OLIVA F., SANFORD R.L., KELLY E., 1999. Effect of burning of tropical deciduous forest soil in Mexico on the microbial degradation of organic matter. *Plant and Soil* 206, 29-36.
- GIARDINA C.H., RHOADES C.H., 2001. Clear cutting and burning effect nitrogen supply, phosphorus fractions and seedling growth in soils from a Wyoming lodgepole pine forest. *Forest Ecology and Management* 140, 19-28.
- GREGORICH E.G., ELLERT B.H., MONREAL C.M., 1995. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon from ¹³C abundance. *Can J Soil Sci* 75, 161-167.
- GREGORICH E.G., JANZEN H.H., 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. En: Structure and organic matter storage in agricultural soils (Carter M.R., Stewart B.A., eds). Lewis publishers. Boca Raton Florida. pp. 167-192.
- GONÇÁLVEZ J.L.M., BARROS N.F., NAMBIAR E.K.S., NOVAIS R.F., 1997. Soil and stand for short-rotation plantations. In: Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Nambiar EKS, AG Brown eds Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Monograph 43, Canberra. pp. 379-417.
- GOYA J., PÉREZ C., FRANGI J.L., FERNÁNDEZ R.A., 2003. Impacto de la cosecha y del destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13, 139-150.
- JANSEN H.H., CAMPELL C.A., BRANDT S.A., LANDFOND G.P., TOWNLEY-SMITH L., 1992. Light fraction organic matter from long-term crop rotations. *Soil Sci Soc American Journal* 56, 1789-1806.
- KHANA P.K., ULRICH B., 1991. Ecochemistry of temperate deciduous forests. In: Ecosystems of the world temperate deciduous forest. Röhrig E, B Ulrich. Eds. Vol. 7. Elsevier, NY.
- LEIFELD J., KÖGEL-KNABNER I., 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma* 124, 143-155.
- LUGO A.E., SÁNCHEZ M.J., BROWN S., 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil* 96, 185-196.
- MARSHALL V.G., 2000. Impacts of forest harvesting on biological processes in northern forest soil. *Forest Ecology and Management* 133, 43-60.
- MCLAUCHLAN K.K., HOBBIIE S.E., 2004. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science American Journal* 68, 1616-1625.
- MUGGLER C.C., GRIETHUYSEN C., BUURMAN P., PAPE T., 1999. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in oxisols from minas gerais, Brazil. *Soil Science* 164(10), 759-770.
- N'DAYEGAMIYE A., ANGERS D.A., 1993. Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications. *Canadian J Soil Science* 73, 115-122.
- NEARY D.G., KLOPATEK C.C., DEBANO L.F., FOLLIOTT P.F., 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecol and Management* 122, 51-71.
- OADES J.M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56, 377-400.
- PICCOLO G.A., 1996. Transformaciones de la materia orgánica de un suelo rojo (Kandihumult), durante el período de degradación y recuperación de la fertilidad. Tesis Magíster en Ciencias del Suelos. Ingeniero Agrónomo Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 117 pp.
- RAISON R.J., 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review. *Plant and Soil* 51, 73-108.
- RAISON R.J., O'CONNELL A.M., KHANA P.K., KEITH H., 1993. Effects of repeated fires on nitrogen and phosphorous budget in cycling processes in forest ecosystem. In: Fire in mediterranean ecosystem Trabaud L, R Prodon eds. CEC, Brussels-Luxembourg. pp. 347-363.
- RASMUSSEN P.E., PARTON W.J., 1994. Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 58, 523-530.
- RICHTER M., MIZUNO I., ARANGUEZ S., URIARTE S., 1975. Densimetric fractionation of soil organomineral complexes. *Journal of Soil Science* 26, 112-123.
- ROBERSTON K., 1998. Loss of organic matter and carbon during slash burns in New Zealand exotic forests. *New Zealand Journal Forestry Science* 28, 221-241.
- ROJAS E.I., 1997. Dinámica del hierro y su rol como factor de agregación en un Ultisol de Misiones bajo dife-

- rentes manejos. Tesis Magíster en Ciencias del Suelos. Ingeniero Agrónomo Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, 1999. Proyecto Forestal de Desarrollo, Convenio BIRF N.º 3948-AR. Oportunidades de inversión en bosques cultivados. Argentina.
- SHANG C., TIESSEN H., 1997. Organic matter lability in a tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size density and magnetic fractionations. *Soil Science* 162(11), 795-807.
- SIX J., ELLIOTT E.T., PAUSTIAN K., DORAN J.W., 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci Soc Am J* 62, 1367-1377.
- SOIL SURVEY STAFF, 1994. Keys to soil taxonomy. Pochontas Press Blacksburg, VI.
- TISDALL J.M., OADES J.M., 1980. The effect of crop rotation on aggregates in a red brown earth. *Australian J Soil Reserch* 18, 423-433.
- TISDALL J.M., OADES J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33, 141-163.
- WALKLEY A., BLACK I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci* 37, 29-38.
- WORRELL R., HAMPSON A., 1997. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils-a review. *Forestry* 70(1), 61-85.