

## STOCK DE CARBONO Y CONDICIÓN FÍSICA DE UN KANDIUDULT BAJO DISTINTOS MANEJOS FORESTALES EN LA PROVINCIA DE MISIONES

ALEJANDRA VON WALLIS<sup>1-2\*</sup>; RODOLFO MARTIARENA<sup>1</sup>; NORBERTO PAHR<sup>1-2</sup> & MIGUEL ANGEL TABOADA<sup>3-4</sup>

Recibido: 16-11-15

Recibido con revisiones: 26-01-16

Aceptado: 15-02-16

### RESUMEN

El mantenimiento del contenido de carbono orgánico y de una adecuada condición física es un requisito esencial en suelos subtropicales con excesiva pluviosidad como los de la provincia de Misiones, en los cuales los métodos tradicionales de preparación del terreno para plantaciones forestales generan riesgos de erosión hídrica. En un ensayo de campo con cuatro años de antigüedad con diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA; n = 5), se determinaron los contenidos y stocks de carbono orgánico y diferentes propiedades físicas de un suelo Kandiuult para evaluar la efectividad de cuatro métodos de preparación del terreno para plantar *Pinus eliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *Hondurensis*. Una situación vecina de bosque nativo (BN) fue usada como referencia comparativa. La densidad aparente fue mínima en el BN (0,96 a 1,31 Mg m<sup>-3</sup> en capas de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), y fue aumentada significativamente (P < 0,05) por el rastreado (1,45 Mg m<sup>-3</sup> en la capa 0-10 cm). Esta compactación excesiva fue disminuida significativamente (P < 0,05) por el subsolado (1,35-1,36 Mg m<sup>-3</sup> en las capas 0 a 20 cm). Los máximos contenidos de carbono orgánico total (COT= 24,7 a 14,0 g kg<sup>-1</sup>) y stock de carbono (63,4 Mg ha<sup>-1</sup>) fueron observados en las capas 0 a 30 cm del BN. Sólo la capa 0-10 cm mostró impactos significativos de los manejos de preparación del terreno sobre los contenidos de COT, que fueron significativamente menores (P < 0,05) con subsolado (13,3 g kg<sup>-1</sup>) y más altos con regeneración natural por conservación de residuos sin plantación (20,6 g kg<sup>-1</sup>). Los stocks de carbono (0-30 cm), expresados como masa equivalente al BN, fueron significativamente más altos (P < 0,05) con regeneración natural (51,0 Mg ha<sup>-1</sup>) que con otros métodos más agresivos como subsolado y rastra (39,8 y 42 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). El índice de inestabilidad estructural fue poco afectado por los manejos (88-100% de BN). La quema de residuos en el campo sólo causó disminuciones significativas (P < 0,05) de densidad aparente en la preparación con rastra en las capas 0-20 cm. Puede concluirse que las mejores opciones de preparación del terreno en el área estudiada fueron: a) el subsolado, que disminuyó la excesiva compactación del suelo; y b) la conservación de los residuos sobre la superficie, que contribuyó a secuestrar más C orgánico en el suelo.

**Palabras clave.** Bosque nativo, preparación del terreno, compactación del suelo.

### SOIL CARBON STOCK AND PHYSICAL CONDITION OF A KANDIUDULT UNDER DIFFERENT FOREST MANAGEMENTS IN MISIONES PROVINCE

#### ABSTRACT

The maintenance of soil organic carbon content and adequate physical condition is an essential requirement in subtropical soils with excessive rainfall such as those in the province of Misiones, in which traditional soil preparation methods for woodland plantations generate water erosion risks. In a four year old field trial with completely randomized block design (CRBD; n = 5), soil organic carbon contents and stocks (0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm layers) and different soil physical properties were determined in a Kandiuult soil to assess four soil preparation methods for planting *Pinus eliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *Hondurensis* effectiveness. A native forest (NF) neighbor situation was used as a comparative reference. Soil bulk density was low in the NF (0.96 to 1.31 Mg m<sup>-3</sup> in the 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm layers), and was significantly (P < 0.05) increased by soil harrowing (1.45 Mg m<sup>-3</sup> in the 0-10 cm layer). This excessive compaction decreased significantly (P < 0.05) by subsoiling (1.35 to 1.36 Mg m<sup>-3</sup> in the 0-10 cm and 10-20 cm layers). The maximum levels of total organic carbon (24.7 to 14.0 g kg<sup>-1</sup>) and carbon stock (63.4 Mg ha<sup>-1</sup>) were observed in NF (0-30 cm). Soil preparation methods only affected soil organic carbon contents in 0-10 cm layer, with significantly higher (p < 0.05) values in subsoiling (13.3 g kg<sup>-1</sup>) and higher with natural regeneration of conservation of forest residues without plantation (20.6 g kg<sup>-1</sup>). Soil carbon stocks (0-30 cm), expressed as NF equivalent soil mass, were significantly higher (P < 0.05) with natural regeneration (51.0 Mg ha<sup>-1</sup>) than with other more aggressive methods such as harrowing and subsoiling (39.8 and 42 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively). The structural instability index was little affected by soil preparation methods (88-100% of NF). Residue burning in the field only caused significant bulk density reductions (P < 0.05) in the top 20 cm of the harrowed plot. It can be then concluded that the best options for soil preparation in the studied area were: a) subsoiling that decreased excessive soil compaction; and b) forest residues conservation on the surface, which contributed to sequester more organic C in the soil.

**Key words.** Native forest, land preparation, soil compaction.

1 INTA EEA Montecarlo

2 Facultad de Ciencias Forestales, UNaM

3 INTA, CIRN, Instituto de Suelos

4 CONICET

\* Autor de contacto: vonwallis.alejandra@inta.gob.ar

## INTRODUCCIÓN

Las regiones tropicales y subtropicales húmedas, como es el caso de la provincia de Misiones, presentan suelos rojos arcillosos, altamente meteorizados, los cuales evolucionaron con vegetación de bosque nativo húmedo, cuyos fragmentos remanentes por cambio de uso de la tierra conservan la mayor biodiversidad del planeta (Cabrera, 1976; Huek, 1978; Bierregaard Jr. *et al.*, 1992). Actualmente muchos de estos suelos son destinados a plantaciones forestales comerciales, como pino o eucalipto (Scott *et al.*, 1999).

A diferencia de los suelos de clima templado, por ser más evolucionados los suelos rojos de estas regiones tienden a ser más frágiles, presentan menor fertilidad y se compactan con mayor facilidad por su mayor contenido de arcilla, aunque poseen elevada tasa de infiltración por su estructura en forma de glomérulos cubiertos por sesquióxidos de hierro y aluminio (Cassel & Lal, 1992), que se ve favorecida con altos contenidos de materia orgánica. No obstante este tipo de estructura, estos suelos se degradan fácilmente cuando se elimina el bosque nativo, en especial por la ocurrencia de pérdidas de suelo por erosión y pérdidas de materia orgánica (Sánchez, 1981; Feller & Beare 1997; Hartemink, 2002). A diferencia de suelos templados, los suelos tropicales presentan menor resiliencia frente a un disturbio (Sánchez, 1981). De acuerdo a Cassel & Lal (1992), existe escaso nivel de conocimiento, acerca del funcionamiento físico-mecánico de estos suelos, en especial cuando se implementan distintas estrategias de manejo forestal para recuperar los niveles de materia orgánica.

La actividad forestal en la provincia de Misiones, que genera el mayor producto bruto interno de la provincia, está instalada en su gran mayoría sobre suelos rojos pertenecientes a los Grandes Grupos (Soil Survey Staff, 1999) Kandiuultes y Kandiualfes (Ligier *et al.*, 1990). La plantación forestal requiere generalmente un sistema integrado de prácticas culturales que incluye la deposición de los residuos de la cosecha, la preparación del sitio, la plantación y el posterior mantenimiento (Fisher & Binkley, 2000). De ellos, la cosecha y la preparación de terreno son los que más influyen sobre el estado de conservación del recurso suelo. Lo más frecuente es la utilización de rastra de discos como método de preparación del terreno, lo cual puede producir compactación, además de aumentar los problemas de erosión hídrica al permitir incrementos en el escurrimiento del agua, con la consecuente pérdida de materiales y baja capacidad de almacenamiento de hume-

dad (Ohep, 1998). A menudo la excesiva cantidad de residuos de la cosecha determina la necesidad de eliminarlos o reducirlos por quema. La quema más habitual en el sector forestal de Misiones se realiza en escolleras, con altas temperaturas e intensidades de fuego que afectan las capas más superficiales del suelo. Propiedades como la estructura, porosidad, infiltración, régimen térmico y almacenamiento de agua pueden ser afectadas por el fuego (Neary *et al.*, 1999), como también disminuye el contenido de materia orgánica, por el incremento de la mineralización y la disminución de la biomasa microbiana (Giardina *et al.*, 2000). La degradación de los compuestos orgánicos y la oxidación del carbono es completa a temperaturas de 400 a 500 °C (Gray & Dighton, 2006).

La presencia de capas compactas subsuperficiales suele corregirse con subsolado, práctica que reduce la densidad y aumenta la porosidad de los horizontes del subsuelo, rompiendo, entre otros, suelos compactados y arcillosos, facilitando el desarrollo radical, la capacidad de retención de agua y la velocidad de infiltración (Ibáñez *et al.*, 2004). En los últimos años se ha comenzado a recomendar la conservación superficial de los residuos de cosecha sobre el suelo. Estos sirven como barrera física para el libre escurrimiento superficial del agua, disminuyendo su velocidad o capacidad erosiva, incrementando la porosidad total, la agregación y el contenido de humedad en capacidad de campo (Volk *et al.*, 2004; Mulumba & Lal, 2008). El objetivo de este trabajo fue evaluar el stock de carbono y el estado físico de un Kandiuult de Misiones bajo uso forestal con distintos sistemas de preparación de terreno y manejo de residuos de cosecha, y contrastar estas situaciones con el bosque nativo cuasi prístino existente en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caracterización del área de estudio

El estudio se realizó al norte de la provincia de Misiones, en la localidad de Puerto Esperanza, Departamento Iguazú, en una propiedad de la Empresa Pindó S.A. ubicado entre los 26°01'S y los 54°37'O aproximadamente, donde se evaluó al cuarto año un ensayo de preparación de sitio instalado en el año 2005. El mismo forma parte de una forestación de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *hondurensis* que fuera instalada luego de la tala rasa de una plantación anterior de *P. hondurensis* de 22 años de edad (Martarena *et al.*, 2007). El clima del área de estudio es subtropical cálido y húmedo con régimen tipo isohigro. Las precipitaciones son de 1800 a 2000 mm anua-

les y la temperatura media es del orden de los 21 °C, con una amplitud térmica anual de 11 °C. Los suelos existentes en la zona están representados por un complejo de Kandiuultes y Kandiuulfes ródicos (Soil Survey Staff, 1999), arcillosos, bien drenados, sumamente profundos y muy fuertemente ácidos, presentando su limitación más destacada en función de la pendiente por su alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

### Diseño del experimento

Se aplicó un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro tratamientos y cinco repeticiones: a) Conservación de Residuos y plantación manual (CRes); b) Subsulado y plantación manual (Sub); c) Rastreada y plantación manual (Rast); y d) Regeneración Natural por conservación de Residuos sin Plantación (Reg Nat). Por otra parte, se evaluó el impacto de la quema de residuos en escollera en cinco parcelas en que el suelo se preparó previamente pasando subsolador (QSub) y otras cinco parcelas en que el suelo se preparó rastreando (QRast). Como situación de referencia, se evaluaron tres áreas con bosque nativo aprovechado hace más de 30 años (BN), que se ubican en cercanías del ensayo mencionado, y que presentan el mismo tipo de suelo y demás características ambientales similares al sitio del ensayo.

### Determinaciones

En cada situación evaluada se tomaron muestras compuestas por 5 submuestras disturbadas de las capas 0-10 cm; 10-20 cm y 20-30 cm del suelo, para determinar el contenido de carbono orgánico total del suelo (COT) por el método de combustión húmeda (Walkley & Black, 1934). En cada una de esas profundidades se extrajeron 5 muestras con cilindros (5 cm de diámetro) para determinar su densidad aparente (Dap) (Burke *et al.*, 1986). A partir de los datos de COT y Dap, se calcularon los stocks de C de cada tratamiento para cada capa de 10 cm y la suma de las tres capas. El stock total de C para los primeros 30 cm de suelo, fue corregido a una masa de suelo equivalente, utilizándose como sistema de referencia al suelo de menor masa a partir de una metodología utilizada por Sisti *et al.* (2004).

En tres muestras de la capa 0-10 cm por tratamiento y repetición se determinó la inestabilidad estructural, utilizando el cambio en el diámetro medio ponderado entre tamizado en seco y en agua (CDMP), propuesto por De Leenheer y De Boedt (Burke *et al.*, 1986), en tanto que en dos muestras obtenidas con cilindros de 5 cm de diámetro por 2,5 cm de altura (capa de 0-10 cm) se determinó el contenido hídrico retenido a 33,3 kPa de potencial mátrico (CH 33,3 kPa), por el método de la olla de presión (Dane y Hopmans, 2002).

### Análisis Estadístico

Las variables del ensayo fueron analizadas estadísticamente mediante análisis de varianza usando el diseño experimental

DBCA con cuatro tratamientos (Sub, Rast, CRes, y Reg Nat) y cinco repeticiones. La comparación entre las medias se realizó con la diferencia mínima significativa con un nivel de confianza del 95%. El impacto de la quema de residuos en escollera se realizó analizando las diferencias entre los tratamientos Qsub y Qrast respecto de Sub y Rast, las que fueron analizadas con t de Student. Se aplicó análisis de regresión para analizar las relaciones entre variables. Se utilizó el programa estadístico Info Stat Profesional (Di Rienzo *et al.*, 2010).

## RESULTADOS

### Carbono orgánico total

En la capa de suelo de 0-10 cm, de los métodos de preparación del terreno el tratamiento con conservación de residuos sin plantación (Reg Nat) presentó un contenido de COT significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que los demás tratamientos evaluados (Tabla 1), en tanto que el tratamiento con subsulado (Sub) fue el que mostró menor contenido de COT.

Los niveles de COT sólo mostraron impactos significativos ( $P < 0,05$ ) de los tratamientos de preparación del terreno en la capa 0-10 cm, con valores más bajos en Sub y más altos en Reg Nat. En las capas 10-20 cm y 20-30 cm no se detectaron diferencias estadísticas en COT entre los tratamientos, aunque sí esperables menores contenidos de COT (Tabla 1).

### Densidad aparente

La Dap mostró diferencias significativas entre tratamientos en todas las capas evaluadas de suelo. En relación con BN los valores de BN mostraron aumentos importantes en todas las capas, y todos los tratamientos excepto Sub, con valores de Dap que llegaron a 1,52 Mg m<sup>-3</sup>. Esta compactación excesiva fue disminuida significativamente por el subsulado (Sub) en todas las capas.

Se halló una relación lineal significativa ( $P < 0,01$ ) entre Dap y COT según esta función:

$$\begin{aligned} \text{Dap (Mg m}^{-3}\text{)} &= 1,782 - 0,0247 \text{ COT (g kg}^{-1}\text{)} \\ R^2 &= 0,604^{***} \end{aligned} \quad [1]$$

### Stocks de Carbono del suelo

Los stocks de C orgánico siguieron la misma distribución de COT, con valores más altos en la capa 0-10 cm (Tabla 1). El stock de C orgánico acumulado en los primeros 30

Tabla 1. Contenido de carbono orgánico total, densidad aparente (cilindro) y stocks de carbono orgánico en diferentes capas del suelo, en los tratamientos del ensayo de preparación de terreno para pino híbrido y el bosque nativo cuasi prístino de la zona. Las diferencias significativas al 5% de probabilidad entre tratamientos de implantación de *Pinus* son indicadas por letras diferentes en cada profundidad de suelo.

Table 1. Total organic carbon content, core bulk density and organic carbon stocks in different soil layers, in treatments of the land preparation experiment for hybrid pine plantation, and the quasi-pristine forest. Differences between the means at the 5% probability level in treatments of *Pinus* implantation are indicated by different

Carbono Orgánico Total (g kg <sup>-1</sup> )					
Capas del suelo (cm)	Sub	Rast	Cres	Reg Nat	BN
0-10	13,3 c	14,6 bc	16,6 b	20,6 a	24,7
10-20	10,9 a	10,6 a	10,1 a	11,1 a	17,2
20-30	8,8 a	8,5 a	9,0 a	9,2 a	14,0
Densidad Aparente (Mg m <sup>-3</sup> )					
0-10	1,35 b	1,45 a	1,42 ab	1,38 ab	0,96
10-20	1,36 b	1,57 a	1,55 a	1,56 a	1,24
20-30	1,37 b	1,50 a	1,51 a	1,52 a	1,31
Stock de C (Mg ha <sup>-1</sup> )					
0-10	17,9 c	21,2 bc	23,6 b	28,4 a	23,0
10-20	14,3 b	16,6 ab	15,7 ab	17,3 a	21,3
20-30	12,1 a	12,7 a	13,6 a	14,0 a	18,3
0-30	44,8 b	50,6 ab	52,8 ab	59,7 a	63,4
Stock de C corregido a masa de suelo equivalente al BN (Mg ha <sup>-1</sup> )					
0-30	39,8	42,0	44,1	51,0	63,4

Sub: Subsolado; Rast: Rastra; CRes: Conservación de Residuos; Reg Nat: Regeneración Natural y BN: Bosque nativo cuasi Prístino.

Sub: Subsoiling; Rast: disc harrowing; CRes: slash conservation; Reg Nat: slash conservation without new planting and BN: cuasi pristine native forest.

cm del suelo fue más alto en BN. De los métodos de preparación del terreno, la regeneración natural (Reg Nat) presentó mayor stock de C, mientras que Sub menor stock de C.

Considerando que el BN tuvo la menor densidad aparente, y por consiguiente la menor masa de suelo (Tabla 1), para calcular los stocks de C para una masa equivalente de suelo, los stocks de C se refirieron al suelo del BN, usando un procedimiento análogo al usado por Sisti *et al.* (2004). Estos stocks corregidos de C se ordenaron de forma similar a los no corregidos, pero con diferencias de mayor magnitud. Es así que Sub y Rast conservaron, respectivamente sólo 62,8% y 66,2% del stock de BN, mientras que CRes y Reg Nat conservaron 69,6% y 80,5%, respectivamente (Tabla 1).

### Contenido hídrico en 33,3 kPa de potencial mátrico y su relación con el COT

Los valores de CH33,3 kPa fueron cercanos a 40%g en el BN, y sensiblemente inferiores (24 a 29%g) en los

tratamientos de manejo del suelo (Tabla 2). De los métodos de preparación del suelo, los valores de CH33,3 kPa fueron significativamente ( $P < 0,05$ ) más altos en Reg Nat y más bajos en los restantes tratamientos. Los valores de CH33,3 kPa estuvieron relacionados linealmente con el COT del suelo, según la siguiente función:

$$\text{CH33,3 kPa (\%g)} = 6,241 + 1,224 \text{ COT (g kg}^{-1}\text{)} \quad [2]$$

$$R^2 = 0,859^{***}$$

### Inestabilidad Estructural

Ni los valores de CDMP ni los del índice de inestabilidad estructural fueron afectados por los métodos de preparación del suelo (Tabla 2). Los valores IEE% fueron muy elevados, y representaron como mínimo un 90% de lo hallado en BN.

Tabla 2. Contenido hídrico gravimétrico del suelo retenido en 33,3 kPa de potencial mátrico (CH33,3 kPa), y valores medios y errores estándar (ES) del cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados entre tamizado en seco y en agua (CDMP) e Índice de estabilidad estructural (IEE) para los distintos tratamientos del ensayo de preparación de terreno para pino híbrido y el bosque nativo cuasi prístino de la zona. Las diferencias significativas al 5% de probabilidad entre tratamientos de implantación de *Pinus* son indicadas por letras diferentes en cada capa de suelo.

Table 2. Gravimetric water content at 33,3 kPa matric potential and change in aggregate mean weight diameter between dry- and wet-sieving (CDMP) and structural stability index (IEE), in treatments of the land preparation experiment for hybrid pine plantation, and the quasi-pristine forest. Differences between the means at the 5% probability level in treatments of *Pinus* implantation are indicated by

	Sub	Rast	CRes	Reg Nat	BN
CH 33.3 KPa (%g)	23,92 b	24,35 b	24,8 b	28,7 a	39,0
CDMP (mm)	1,12 a	1,10 a	1,03 a	1,16 a	0,99
IEE (%)	90,2 a	95,9 a	99,4 a	85,8 a	100

Sub: Subsulado; Rast: Rastra; CRes: Conservación de Residuos; y BN: Bosque nativo cuasi Prístino.

Sub: Subsoiling; Rast: disc harrowing; CRes: slash conservation; and BN: cuasi pristine native forest.

### Cambios causados por la quema de residuos forestales

La Tabla 3 muestra las diferencias porcentuales de diferentes variables edáficas por la quema en escollera de residuos forestales, y su análisis de significancia usando el estadístico t. Puede observarse que las diferencias causadas por la quema en el tratamiento Sub (QSub - Sub) nunca fueron significativas. En cambio, en el tratamiento Rast (QRast - Rast) se registraron diferencias negativas significativas en la Dap de las capas 0-10 cm y 10-20 cm. Ello significa que en Rast la quema de residuos hizo disminuir la Dap en los primeros 20 cm. No hubo cambios significativos en el resto de las propiedades estudiadas.

## DISCUSIÓN

### Efectos de los métodos de preparación del terreno

Los métodos de preparación del terreno sólo afectaron al contenido de C orgánico de la capa superficial del suelo (0-10 cm), no así a las capas subyacentes (Tabla 1). En la capa 0-10 cm el tratamiento Reg Nat fue el que presentó los contenidos significativamente más altos de COT, mientras que Sub, Qsub y Rast presentaron los contenidos significativamente más bajos. El stock de C almacenado en los primeros 30 cm de suelo bajo BN fue 63,4 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabla 1). Llevado a masa equivalente, dicho stock disminuyó entre 15,9 y 23,6 Mg ha<sup>-1</sup> a causa de los manejos implementados en Sub, Qsub, Rast y QRast. Es interesante notar que un manejo *a priori* más amigable, como la conservación superficial de residuos forestales (CRes), no logró recuperar

los stocks de C, sino que por el contrario los disminuyó casi 20 Mg C ha<sup>-1</sup>. Por el contrario, esta recuperación sólo fue parcialmente posible en el tratamiento Reg Nat, en el cual se conservan los residuos pero sin plantación de *Pinus*. En este tratamiento el stock de C corregido fue el que presentó la menor diferencia (12,4 Mg C ha<sup>-1</sup>) respecto al valor encontrado en BN (Tabla 1). Sin embargo, pese a esta recuperación, esta opción de manejo sin plantación no se aplica en la actividad forestal. A diferencia de estos resultados, que muestran la ineffectividad del manejo para recuperar el C del suelo, otros autores hallaron impactos positivos. Yanaj *et al.* (2003) informaron que si las actividades de cosecha y de preparación del terreno forestal se realizan en un marco de cuidado y de buenas prácticas, no se llegan a registrar pérdidas del C orgánico del suelo. Lugo *et al.* (1986) demostraron que el contenido de carbono orgánico de suelos subtropicales puede ser recuperado de manera relativamente rápida si se reduce el laboreo del suelo. En suelos rojos similares de la provincia de Misiones bajo cultivos de yerba mate, Dalurzo *et al.* (2001) hallaron mayores niveles de COT y stocks de C orgánico con regeneración natural, más el agregado de aserrín de pino y eucaliptus. En un ensayo de características similares al planteado, Lupi *et al.* (2006) hallaron aumentos de hasta un 21% en promedio en el C orgánico en los primeros 5 cm del suelo, como resultado de conservar los residuos sobre el suelo.

El método tradicional de preparación del terreno (Rast) causó deterioros de calidad física del suelo, mostrado por aumentos significativos de la Dap en todas las capas (Tabla

Tabla 3. Diferencias porcentuales entre situaciones con residuos quemados en escollera de las parcelas tratadas con subsolado (Sub) y rastreada (Rast) y plantación manual posterior, y las situaciones vecinas no quemadas. \*y \*\*significa que las diferencias son significativamente distintas que cero, usando t de Student.

Table 3. Percentage differences between situations with waste burned in rockfill treated subsoiling (Sub) and tracked (Rast) and subsequent manual planting plots, and neighboring unburned situations. \*And \*\*it means that the differences are significantly different than zero, using Student t test.

	Sub		Rast	
	Diferencias %	Signif.	Diferencias %	Signif.
COT 0-10 cm (g kg <sup>-1</sup> )	5,13	ns	5,55	ns
COT 10-20 cm (g kg <sup>-1</sup> )	-2,57	ns	12,67	ns
COT 20-30 cm (g kg <sup>-1</sup> )	3,64	ns	9,85	ns
Dap 0-10 cm (Mg m <sup>-3</sup> )	-2,22	ns	-8,28	*
Dap 10-20 cm (Mg m <sup>-3</sup> )	5,15	ns	-4,46	**
Dap 20-30 cm (Mg m <sup>-3</sup> )	7,30	ns	-0,67	ns
Stock corregido 0-30 cm (Mg ha <sup>-1</sup> )	-0,10		13,12	
CH 33.3kPa (%g)	6,69	ns	4,23	ns
CDMP (mm)	-1,79	ns	-15,57	ns
IEE (%)	2,28	ns	-10,42	ns

1) y descensos significativos de CH33,3 kPa (Tabla 2). El contenido de COT explicó un 60% y un 85% de las variaciones de Dap (ecuación [1]) y de CH33,3kPa (ecuación [2]), respectivamente. De todos estos cambios, el más relevante es el desarrollo de compactación superficial y profunda. Esta compactación producida no pudo ser revertida por el manejo conservacionista (CRes), mientras que la regeneración natural del bosque (Reg Nat) sólo disminuyó levemente la compactación en la capa superficial. En ambientes húmedos y de suelos arcillosos es muy difícil revertir la compactación causada al suelo por el pasaje de maquinarias, por lo que ésta es perdurable por muchos años, incluyendo el riesgo de compactar también el subsuelo (Balbuena *et al.*, 2000). Estos resultados concuerdan con los hallados por otros autores de la región (Ares *et al.*, 2005; Cantú *et al.*, 2007). Otros estudios indican que los mayores efectos sobre la densidad del suelo se dan cuando la cosecha forestal se realiza en condiciones de suelo húmedo (Eisenbies *et al.*, 2005), pero que el laboreo del suelo revierte esta situación y prácticamente no disminuye la productividad de la plantación posterior.

En el ensayo, los valores de Dap fueron más bajos con el subsolado en las tres capas analizadas, mostrando así la ruptura de capas compactadas por el subsolador (Gonçalves *et al.*, 2002; Sasaki *et al.*, 2007; Ngetich *et al.*, 2008). Trabajando en suelos rojos del norte de Corrientes, Fernández *et al.* (2000) también detectaron efectos positivos similares

del subsolado, lo cual responde a que con este implemento se logra una ruptura hasta horizontes compactados más profundos. También evaluando sistemas de preparación de terreno para *Eucalyptus grandis*, Gatto *et al.* (2003) señalaron diferencias significativas en Dap en los primeros 10 cm del suelo a favor del subsolado respecto del cultivo mínimo y la quema ligera.

Es frecuente que se presenten cambios en la estabilidad de los agregados luego que el suelo es despojado de su cobertura originaria (García Aratani *et al.*, 2009). Sin embargo, de los parámetros de inestabilidad de agregados evaluados, ni el CDMP ni el IEE resultaron sensibles a cambios por efecto del manejo del suelo o por el uso forestal (Tabla 2). Ellies *et al.* (1993) hallaron que al eliminar un bosque nativo y reemplazarlo por otro de pino, se observaron modificaciones estructurales en el suelo con la disminución de la macroporosidad. Es posible que esta fuese la situación del presente estudio, ya que si bien no se registraron cambios en la estabilidad del suelo, sí se produjeron cambios en los tamaños de los agregados (Von Wallis, 2013).

Al no registrarse cambios ni entre los tratamientos del ensayo, ni entre éstos respecto del suelo del bosque nativo de referencia, el comportamiento de la estructura del suelo de la zona resultó poco afectado respecto al uso y al tipo de manejo. Por consiguiente, esta propiedad no resulta ser buena indicadora de degradación de los suelos para la actividad evaluada, quedando demostrado que estos suelos



presentan una alta estabilidad natural. Según Bronick & Lal (2005), la agregación es controlada por diversos factores en los distintos tipos de suelos, y en el caso de los Ultisoles, predomina el humus complejo con el hidróxido de  $Al^{3+}$ , que protegen a la materia orgánica de la descomposición microbiana y favorecen la agregación.

### Consecuencias de la quema de residuos forestales en el campo

En el estudio hubo tratamientos que incluyeron la quema de residuos forestales en escollera, en combinación con rastreado (Qrast) y subsolado (Qsub). Aun cuando existen resultados contradictorios respecto a los efectos de la quema de residuos sobre el C orgánico del suelo, en el presente estudio no se hallaron efectos importantes del fuego sobre la cantidad y el stock de C orgánico presente en los suelos (Tabla 3). Siete años después de la quema de los residuos para preparar el suelo para una plantación forestal en el norte de Misiones, Fernández *et al.* (2010) tampoco hallaron evidencias de impactos sobre el C orgánico del suelo. El único cambio significativo hallado fueron descensos de Dap en los primeros 20 cm del tratamiento Rast. Se desconoce el origen de estos descensos atribuibles al fuego, los que por otra parte fueron de magnitud poco importante (4 a 8%).

Con respecto al escaso impacto del fuego sobre el suelo, se debe tener en cuenta que las respuestas de lo que ocurra cuando se queman los residuos de cosecha, tanto con el C orgánico como con otras propiedades del suelo, depende en gran medida de la intensidad de la quema, de la duración de la misma y del volumen del material quemado y su naturaleza y de cuánto tiempo después de transcurrida la misma se realizan las evaluaciones, entre otros factores (Lal, 2005). Las pérdidas de C orgánico por el calentamiento del suelo durante una quema suelen ser pequeñas (Giardina *et al.*, 2000). Las mayores pérdidas se dan en la superficie del suelo, donde el aumento de temperatura puede llevar a alterar la composición química de la materia orgánica a través de la desecación del suelo, de la modificación térmica o de la liberación de la biomasa microbiana. Es así que la quema de residuos de cosecha forestal puede llevar a aumentar la mineralización de los nutrientes del suelo, con o sin pérdida del carbono orgánico del suelo.

### Cambios respecto al bosque nativo

Como era de esperar, la situación bajo bosque nativo (BN) fue la que mostró los mejores indicadores de calidad de suelo, tal como lo demuestran los mayores niveles de COT y de stocks de C orgánico, así como los menores va-

lores de Dap y CDMP, y mayores de CH33,3 kPa (Tablas 1 y 2). Los valores de Dap en el BN fueron en promedio 24% inferiores que los encontrados en el ensayo, mostrando que al incrementarse la Dap, el manejo forestal causó la compactación del suelo (Tabla 1). Esta mejor calidad de suelo en BN está en consonancia con el carácter del bosque existente, que se encuentra protegido desde hace décadas (Cinto & Bertolini, 2003). Si bien lo que se conserva del bosque original son fragmentos remanentes, a su vez intervenidos para la extracción de productos del bosque como leña y ejemplares de valor comercial (Huek, 1978, Bierregaard Jr. *et al.*, 1992), los resultados muestran que no todas las propiedades del suelo fueron afectadas por esas intervenciones.

La similitud de resultados entre COT y stock de C demuestra que los cambios observados en ellos se debieron primordialmente a los cambios de contenido de C superficiales, independientemente que los suelos bajo tratamientos cambiaran su Dap. La mayor compactación en los métodos de preparación del terreno achicó las diferencias de stock de C con respecto al bosque nativo, tal como lo demuestra la ampliación de las diferencias expresadas sobre masa equivalente de suelo (Sisti *et al.* 2004).

Los resultados aquí encontrados son similares a los hallados por otros autores. Por ejemplo, se conoce que el contenido de C orgánico de suelos tropicales cultivados en forma continua disminuye entre 30 y 60% en unos pocos años, respecto de valores encontrados bajo vegetación natural (Nouvellon *et al.*, 2008; Pulido Moncada *et al.*, 2010), debido al cambio de cantidad y calidad de residuos frescos que ingresan al suelo. Con las sucesivas rotaciones forestales existe un empobrecimiento de la calidad del suelo que queda reflejado básicamente en la caída de los niveles de carbono orgánico (Lupi *et al.*, 2011), lo que fue encontrado en los tratamientos de labranzas de este ensayo (Tabla 1). En forma similar a lo hallado por Medina Méndez *et al.* (2006), el contenido de C orgánico afectó directa y positivamente a la humedad retenida en capacidad de campo del suelo, de manera tal que a mayor cantidad de C orgánico se incrementa dicha retención (ver ecuación [2]). De este modo, el suelo del BN es capaz de retener entre 10 y 16 puntos porcentuales más de CH33,3 kPa que los tratamientos con preparación del suelo, aun cuando algunos tienen manejo conservacionista (Tabla 2). Mulumba & Lal (2008) también refieren sobre el aumento de la capacidad de campo del suelo cuando se mantienen los residuos sobre la superficie del mismo. Según un do-

cumento de FAO (2000), la estrecha relación de la materia orgánica con las arcillas del suelo incrementa la capacidad de retención de agua ya que esta MO puede absorber de tres a cinco veces más de su propio peso.

## CONCLUSIONES

- a) El manejo forestal, cualquiera sea el caso, causó la densificación y compactación de la superficie de los suelos estudiados, en comparación con la situación teóricamente inicial del bosque nativo. La actividad que más marcadamente mejoró la condición física fue el subsolado del suelo, el cual produjo descensos en los valores de densidad aparente del suelo. La conservación de residuos permitió acumular más carbono orgánico y retener más humedad en capacidad de campo.
- b) La quema de residuos en escollera no generó ni mayores pérdidas de C ni deterioros significativos en las propiedades físicas.

Todos los métodos de preparación estudiados empeoraron los indicadores de calidad cuando se los compara a la situación BN, siendo el stock de C y la densidad aparente los indicadores más sensibles y la inestabilidad estructural el menos sensible.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los revisores anónimos y al editor por los útiles comentarios que permitieron mejorar sensiblemente la versión final del artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ares, A; T Terry; R Miller; H Anderson & B Flaming. 2005. Ground-based forest harvesting on soil physical properties and Douglar-Fir growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1822-1832.
- Balbuena, RH; AM Terminiello; JA Claverie; JP Casado & R Marlats. 2000. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 4(3): 453-459.
- Bierregaard, Jr. RO; TE Lovejoy; V Kapos; AA dos Santos & RW Hutchings. 1992. The Biological Dynamics of Tropical Rainforest Fragments. *BioScience* 42: 859-866. Bronick, CJ & R Lal. 2005. Soil structure and management: Review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Burke, W; D Gabriels & J Bouma. 1986. Soil Structure Assessment. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 92 p.
- Cabrera, AL. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. En: Parodi L (ed). Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Buenos Aires. Editorial Acme S.A.C.I., 1-85 p.
- Cantú, MP; A Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25: 173-178.
- Cassel, DK & R Lal. 1992. Soil Physical Properties of the Tropics: Common Beliefs and Management Restraints. In: R Lal & PA Sanchez (ed). Myths and Science of Soils of the Tropics. SSSA Special Publication 29. ISBN: 978-0-89118-924-4, 61-89 p.
- Cinto, JP & MP Bertolini. 2003. Ch. 20. Conservation capacity in Paraná Forest. In: C. Galindo-Leal & I de Gusmao Camara (eds) The Atlantic Forest of South America: biodiversity status, threats, outlooks. Island Press, USA, 227-230 p.
- Dalurzo, HC; RC Serial; S Vázquez & S Ratto. 2001. Indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). Jornadas Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional del Nordeste.
- Dane, JH & JW Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. [3]. In: JH Dane and GC Topp (eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Book series: 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA: 688-690 p.
- Di Rienzo, JA; M Balzarini; L Gonzalez; F Casanoves; M Tablada & CW Robledo. 2010. InfoStat Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba.
- Eisenbies, MH; JA Burger; WM Aust & SC Patterson. 2005. Soil Physical Disturbance and Logging Residue Effects on Changes in Soil Productivity in Five-Year-Old Pine Plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1833-1843.
- Ellies, A; C Ramirez & H Figueroa. 1993. Modificaciones estructurales de un suelo sometido a distintos usos forestales. *Bosque* 14(2): 25-30.
- FAO. 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias\\_agronomicas/c20021221046edafo\\_factoresambientalesy\\_suelos.pdf](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/c20021221046edafo_factoresambientalesy_suelos.pdf) Consultado 18/04/2012.
- Feller, C & M Beare. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- Fernández, R; A Lupi; P Mac Donagh; N Pahr; J Garibaldi; M Alvez; M Marek & P Cortez. 2000. Compactación de suelos causada por el aprovechamiento de bosques subtropicales en Misiones, Argentina. *Avances en Ingeniería Agrícola. Ed. Facultad Agronomía. UBA:* 50-55.
- Fernández, RA; RA Martiarena; AM Lupi; A Von Wallis & N Pahr. 2010. Manejo de residuos para el establecimiento de *Pinus taeda* L. y la condición química del suelo. Impacto a los 86 meses. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 4 pág.
- Fisher, RF & D Binkley. 2000. Ecology and Management of Forest Soils. Third Edition John Wiley & Sons, Inc.
- García Aratani, R; O da Silva; JF Centurión & I Andrioli. 2009. Qualidade física de um latossolo vermelho acríferico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo* 33: 677-687.
- Gatto, A; NF de Barros; R Ferreira de Novais; LM da Costa & JC Lima Neves. 2003. *R. Arbore, Vicosa* 27(5): 635-646.
- Giardina, CP; RL Sanford; IC Dockersmith & V Jaramillo. 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant and Soil* 220: 247-260.



- Gonçalves, JL; JL Stape; MC Wichert; & JL Gava. 2002. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. *En: Gonçalves y Stape Editores. Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. IPEF. Piracicaba, S P, 131-204 p.
- Gray, DM & J Dighton. 2006. Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. *Soil Biol. Biochem.* 38: 1469-1477.
- Hartemink, AE. 2002. Soil science in tropical and temperate regions. *Adv. Agron.* 77: 269-291.
- Huek, K. 1978. Los bosques de Sudamérica; ecología, composición e importancia económica. Estocolmo (Suecia). GTZ. 1978. 476 p.
- Ibáñez, C & P Nuñez. 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento. *Bosque* 25: 69-76.
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecol. Manage.* 220: 242-258.
- Ligier, H; H Matteio; H Polo & J Rosso. 1990. Provincia de Misiones Escala 1:500.000. Atlas de Suelos de la República Argentina, INTA Tomo II., Misiones. 111-154 p.
- Lugo, AE; MJ Sánchez & S Brown. 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil* 96: 185-196.
- Lupi, AM; RA Fernández & A Von Wallis. 2006. Efecto de los residuos forestales sobre el Carbono Orgánico y el Nitrógeno del suelo. Resultados a los 9 años de aplicados los tratamientos. 12° Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales-FCF, UNAM-EEA Montecarlo, INTA 8, 9 y 10 de Junio de 2006-El Dorado, Misiones. Argentina.
- Lupi, AM; MA Cuenca & T Pirolo. 2011. Efecto de la intensidad de uso forestal sobre la calidad química del Suelo. VI Congreso Iberoamericano de Física y Química ambiental. 25 al 29 de abril. México. ISBN: 978 607 7533 95 5. 7 p.
- Martiarena, R; A Von Wallis; R Fernández & O Knebel. 2007. Efecto de prácticas de preparación de terreno sobre el contenido de nutrientes y el crecimiento en plantaciones forestales. *Avances en Ingeniería Agrícola 2005-2007*. ISBN 978-987-1253-29-6. Pg. 303-310
- Medina-Méndez, J; VH Volke-Haller; J González-Ríos; A Galvis-Spínola; MJ Santiago-Cruz & JI Cortés-Flores. 2006. Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Univ. y Ciencia. Trópico Húmedo* 22(2): 17-189.
- Mulumba, LN & R Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 98: 106-111.
- Neary, DG; CC Klopatek; LF DeBano & PF Ffolliott. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecol. Manage.* 122: 51-71.
- Ngetich, F; P Wandahwa & IC Wakindiki. 2008. Long-term effects of tillage, sub-soiling, and profile strata on properties of a Vitric Andosol in the Kenyan highlands. *J. Trop. Agric.* 46(1-2): 1-8.
- Nouvellon, Y; D Epron; A Kinana; O Hamel; A Mabiála; R D'Annunzio; P Deleporte; L Saint André; C Marsden; O Rouspard; JP Bouillet; JP Laclau. 2008. Soil CO<sub>2</sub> effluxes, soil carbon balance, and early tree growth following savannah afforestation in Congo: Comparison of two site preparation treatments. *For. Eco. Manage.* 255: 1926-1936.
- Ohep, C; F Marcano & O Sivira. 1998. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata* L. Walp) en el Yaracuy. *Bioagro* 10(3): 68-75.
- Pulido Moncada, M; B Flores; T Rondón; RM Hernández & Z Lozano. 2010. Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica en dos suelos, Inceptisol y Ultisol, por el uso con cultivo de cítricas. *Bioagro* 22(3): 201-210.
- Sánchez, PA. 1981. Suelos del Trópico. Características y Manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 634pág.
- Sasaki, CM; JL Goncalves & A Pires da Silva. 2007. Ideal subsoiling moisture content of Latosols used in forest plantations. *For. Ecol. Manage.* 243: 75-82.
- Scott, NA; KR Tate; JF Robertson; DJ Giltrap & C Tattersall Smith. 1999. Soil carbon storage in plantation forests and pastures: land-use change implications. *Tellus B* 51: 326-35.
- Sisti, CPJ; HP dos Santos; R Kohmann; BJR Alves; S Urquiaga & RM Boddey. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 76: 39-58.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Volk, LBS; NP Cogo & EV Streck. 2004. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. *Rev. Bras. Ci.Solo* 28: 763-774.
- Von Wallis, A. 2013. Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandiuult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación del terreno forestal y bosque nativo. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. 81p.
- Walkley, A & JA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Yanai, RD; WS Currie & CL Goodale. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: An ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* 6: 197-212.

