

CAPABILITY OF GRASS IN RECOVERY OF A DEGRADED AREA AFTER COAL MINING

CAPACIDAD DE LAS GRAMÍNEAS EN LA RECUPERACIÓN DE UNA ÁREA DEGRADADA DESPUÉS DE LA MINERÍA DEL CARBÓN

Lizete Stumpf^{1*}, Eloy A. Pauletto², Rafaela Costa de-Castro³, Luiz F. Spinelli-Pinto², Flavia Fontana-Fernandes², Tiago Stumpf da-Silva⁴, Jordano Vaz-Ambus⁴, Gabriel Furtado-Garcia⁴, Claudia L. Rodrigues de-Lima², Márcio R. Nunes⁵

¹Post Graduate in Agronomy. (zete.stumpf@gmail.com). ²Soil's Department. (pauletto_sul@yahoo.com.br) (lfsin@uol.com.br) (f_flavia_fernandes@yahoo.com) (brclrlima@yahoo.com.br). ³Federal University of Pelotas. (rcostadecastro@gmail.com). ⁴Faculty of Agronomy. (tiago.stumpf@hotmail.com) (jv.ambus@gmail.com) (gabrielgarciag2@hotmail.com). ⁵Post Graduate in Management and conservation of water and soil. (marcio_r_nunes@yahoo.com.br). Federal University of Pelotas. Street Campus Universitário Capão do Leão, s/n. Post office 354, CEP: 96900-010. Capão do Leão/RS.

ABSTRACT

Surface coal mining causes an intense topographic and hydrologic change in the area with suppression of local vegetation, degrading the environment. One main problem presented by the rehabilitated soil refers to physical disruption of the soil, which delays the regrowth of plant species in the mining area. The objective of this study was to evaluate the influence of four grass species in the retrieval of the rehabilitated soil's physical properties at a recovered coal mine area in Candiota, Rio Grande do Sul State, southern Brazil. With the data an ANOVA was performed and treatments means were compared using Tukey test ($p \leq 0.05$). The treatments were: T1-*Hemarthria altissima*; T2-*Paspalum notatum*; T3-*Cynodon dactylon*; T4-*Urochloa brizantha*; a rehabilitated soil without vegetation cover was used as control. Preserved soil samples after 78 months were collected in the 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m layers to determine bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity and available water capacity. The process of rehabilitation of coal mined areas was slow due to the high degree of degradation that occurs during the extraction of coal and the topographic recovery of the area, adversely affecting the structural quality of the soils. The assessed grasses showed potential to reclaim these areas, since improvements were observed in the values of the soil attributes over time, especially in the 0.00-0.10 m layer. After 78 months of evaluation, *U. brizantha* showed

RESUMEN

La minería del carbón en superficie provoca un intenso cambio topográfico e hidrológico en la zona por la supresión de la vegetación local, degradando el ambiente. Un problema principal presentado por el suelo rehabilitado es la perturbación física del suelo, lo que retrasa el rebrote de las especies vegetales en el área minera. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de cuatro especies de gramíneas en la recuperación de las propiedades físicas del suelo en un área minera de carbón rehabilitada en Candiota, Rio Grande do Sul, sur de Brasil. Con los datos se realizó un ANDEVA y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los tratamientos fueron: T1-*Hemarthria altissima*; T2- *Paspalum notatum*; T3-*Cynodon dactylon*; T4-*Urochloa brizantha*; un suelo rehabilitado sin cubierta vegetal se usó como testigo. Muestras de suelo protegido se recolectaron después de 78 meses en capas de 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m para determinar densidad aparente, porosidad total, macroporosidad, microporosidad y capacidad de agua disponible. El proceso de rehabilitación de las zonas de minas de carbón fue lento debido al grado alto de degradación producido durante la extracción de carbón y la recuperación topográfica de la zona, lo que afecta negativamente la calidad estructural de los suelos. Las gramíneas evaluadas mostraron potencial para recuperar estas áreas, ya que se observaron mejoras en los valores de los atributos del suelo en el tiempo, especialmente en la capa de 0.00 a 0.10 m. Después de 78 meses de evaluación, *U. brizantha* mostró el potencial mayor para recuperar las propiedades físicas de los suelos rehabilitados de las minas.

*Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: November, 2013. Approved: June, 2014.

Published as ARTICLE in Agrobiencia 48: 477-487. 2014.

the higher potential to recover the physical properties of the compacted rehabilitated mine soils.

Key words: *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum*, *Cynodon dactylon*, *Urochloa brizantha*, rehabilitated soils, physical properties.

INTRODUCTION

Altered ecosystems in the case of surface mining are related to the removal of the original vegetation and layers of soil and rocks, resulting in topography changes and the hydrological regime of the area (Rodrigues *et al.*, 2007). The degraded ecosystem may not return to its previous state or its return may be slow (Alves and Souza, 2011).

Coal mining in Candiota, Brasil, is the surface mining type with the removal of topsoil (soil horizons A, and sometimes B) and then overburden (geological strata-sandstones, shales, siltstones, and claystones). For the topographic rehabilitation of the area, overburden is placed back into the previous open pit and leveled. The landscape rehabilitation is completed by replacing the topsoil removed before excavation.

During the soil rehabilitation process there is an intense traffic of heavy machinery over the area compacting the layer of soil replaced on the overburden. According to Horn *et al.* (1995) repeated wheeling induces a denser rearrangement of soil aggregates and the formation of a platy structure.

The rehabilitation of degraded areas from mining requires the use of specific techniques, according to the region and type of ore exploited, and there is no definitive model for the recovery of these areas (Silva *et al.*, 2006). The growth of a vegetative cover on mined surfaces is the most common measure of recovery (Silva and Corrêa, 2010), but it is a slow and difficult process, requiring the choice of plants that are good for growth and development in these degraded environments (Alves *et al.*, 2007).

Grass coverage is of great interest in the recovery process because it plays an important role in rebuilding the physical and chemical characteristics of the substrate (Amaral *et al.*, 2012). Grasses, due to their capacity of soil protection against the impact of rain water, wind and their role in promoting soil aggregation through the supply of organic matter (Avaretto *et al.*, 2000),

Palabras clave: *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum*, *Cynodon dactylon*, *Urochloa brizantha*, suelos rehabilitados, propiedades físicas.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas alterados en el caso de la minería a cielo abierto están relacionados con la eliminación de la vegetación original y las capas del suelo y las rocas, causando cambios de la topografía y el régimen hidrológico de la zona (Rodrigues *et al.*, 2007). El ecosistema degradado puede no volver a su estado anterior o su retorno puede ser lento (Alves y Souza, 2011).

La minería del carbón en Candiota, Brasil, es la minería a cielo abierto con remoción de la capa superficial del suelo (horizontes A, y, a veces B) y con una sobrecarga (estratos de roca arenisca, lutitas, limolitas y arcillas). Para la rehabilitación topográfica de la zona, la sobrecarga se coloca de nuevo en el hoyo abierto anteriormente y se nivela. La rehabilitación del paisaje se completa reponiendo la capa superior de suelo removida antes de la excavación.

Durante el proceso de rehabilitación del suelo existe un tráfico intenso de maquinaria pesada sobre el área que compacta la capa de suelo reemplazado en la sobrecarga. Según Horn *et al.* (1995), el tráfico repetido induce un reordenamiento más denso de los agregados del suelo y la formación de una estructura laminar.

La rehabilitación de las zonas degradadas de la minería requiere el uso de técnicas específicas, según la región y el tipo de mineral explotado, y no hay un modelo definitivo para la recuperación de estas áreas (Silva *et al.*, 2006). El crecimiento de una cubierta vegetal en superficies minadas es la medida más común de recuperación (Silva y Correa, 2010), pero es un proceso lento y difícil, que requiere elegir plantas buenas para el crecimiento y desarrollo en estos ambientes degradados (Alves *et al.*, 2007).

La cobertura de gramíneas es de gran interés en el proceso de recuperación por su función importante en la reconstrucción de las características físicas y químicas del sustrato (Amaral *et al.*, 2012). Las gramíneas, debido a su capacidad de protección del suelo contra el impacto del agua de lluvia, el viento y su función en la promoción de la agregación del suelo al suministrar materia orgánica (Avaretto *et al.*, 2000), así como a través de su sistema radicular abundante y

as well as through their abundant and extensive root system in constant renewal in the soil (Campos *et al.*, 1999), are used in regeneration programs of degraded areas. According to Angers and Caron (1998), one of the most significant plant-induced changes in soil structural form is the formation of continuous macropores by penetrating roots in the soil (Bronick and Lal, 2005). In this context, the aim of this study was to analyze the influence of four grass species in recovering the density, porosity and water holding capacity of a rehabilitated soil over time in the area of a coal mining in Candiota/RS.

MATERIAL AND METHODS

This study was conducted on a rehabilitated coal mine area belonging to the Companhia Riograndense de Mineração (CRM), in Candiota, Rio Grande do Sul State. The layer of replaced soil in the experimental area had been taken from a B horizon of the soil of the pre-mined area, a Rhodic Lixisol as indicated by the reddish color (2.5 YR 3.5/6), with a low organic matter content and clay textural class in the 0.00-0.20 m layer (Table 1).

The soil of the experimental area was scarified with a bulldozer to a depth of 0.15 m due to the highly compacted condition, derived from uncontrolled topsoil deposition and leveling operations made by 20 t trucks and a 38 t bulldozer (3.6 m² contact area). The soil was then prepared with a disk harrow, limed with 10.4 t ha⁻¹ of limestone (100 % ECCE) and fertilized with 900 kg ha⁻¹ 5-20-20, according to the results obtained by the soil analysis.

The soil was rehabilitated in early 2003 and the experiment started in November/December 2003. For the experiment 20 m² plots (5 m×4 m) were used, with four repetitions per treatment in a randomized block design, and treatments (T) were: T1) *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C.E. Hubb.; T2) *Paspalum notatum* Alain ex Flüggé cv. Pensacola; T3) *Cynodon dactylon* (L.) Pers. cv. Tifton 85; T4) *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R.D. Webster. Seedlings were

extenso en constante renovación en el suelo (Campos *et al.*, 1999), se usan en programas de regeneración de áreas degradadas. Según Angers y Caron (1998), uno de los cambios más significativos inducido por la planta en la forma estructural del suelo es la formación de macroporos continuos mediante la penetración de las raíces en el suelo (Bronick y Lal, 2005). En este contexto, el objetivo de este estudio fue analizar la influencia de cuatro especies de gramíneas en la recuperación de la densidad, porosidad y la capacidad de retención de agua de un suelo rehabilitado a través del tiempo en el área minera de carbón en Candiota/RS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en un área rehabilitada de la mina de carbón de la Companhia Riograndense de Mineração (CRM), en Candiota, Rio Grande do Sul. La capa de suelo reemplazado en el área experimental se tomó de un horizonte B del suelo de la zona pre-minada, un suelo Rhodic Lixisol según lo indica el color rojizo (2.5 YR 3.5/6), con un contenido bajo de materia orgánica y con textura arcillosa en la capa de 0.00-0.20 m (Cuadro 1).

El suelo del área experimental fue escarificada con un excavadora a una profundidad de 0.15 m debido a la condición altamente compactada, derivada de los vertidos incontrolados de tierra vegetal y nivelación realizadas por camiones de 20 t y un bulldozer de 38 t (3.6 m² área de contacto). Luego se preparó el suelo con una rastra de discos, fue encalado con 10.4 t ha⁻¹ de piedra caliza (100 % ECCE) y fertilizado con 900 kg ha⁻¹ 5-20-20, según los resultados del análisis de suelos.

El suelo se rehabilitó a principios de 2003 y el experimento se inició en noviembre/diciembre de 2003. En el experimento se usaron parcelas de 20 m² (5 m×4 m), con cuatro repeticiones por tratamiento con un diseño de bloques al azar y los tratamientos (T) fueron: T1) *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C.E. Hubb.; T2) *Paspalum notatum* Alain ex Flüggé cv. Pensacola; T3) *Cynodon dactylon* (L.) Pers. cv. Tifton 85; T4) *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R.D. Webster.

Table 1. Chemical and physical properties of the surface layer of the rehabilitated soil prior to the experiment.
Cuadro 1. Propiedades químicas y físicas de la capa superficial del suelo rehabilitado antes del experimento.

pH in water	Carbon %	Ca	Mg	Al	Potential acidity	CEC	K	Na	P	Sand	Silt	Clay
		cmol _c kg ⁻¹					mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹		
5.60	0.67	2.65	2.11	1.28	3.80	8.69	27.66	11.64	1.23	326.80	207.40	465.40

used for T1 and T3 treatments, spaced between 0.10-0.15 m in the row and 0.40 m between rows. For T2 and T4, 200 g and 140 g of seeds were used per plot, corresponding to 50 and 35 kg ha⁻¹, respectively. The results from each grass treatment were compared to results from a rehabilitated bare control soil located next to the experimental area.

In order to analyze the effect of liming and fertilization after 78 months of experiment, disturbed samples were collected in the 0:00 to 0:10 m and 0.10-0.20 m layers to determine: water pH, organic carbon, calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (H+Al), potassium (K), sodium (Na), and phosphorous (P), according to Tedesco *et al.* (1995). To determine of bulk density (Blake and Hartge, 1986), total porosity, macroporosity (Embrapa, 2011), and the available water capacity, 160 undisturbed samples were collected in the 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m layers (4 blocks×5 treatments×2 repetitions per plot×2 soil layers) with steel cylinders (0.030 m high and 0.0485 m diameter).

The undisturbed samples were saturated with water by capillarity for 24 h, and then placed in a tension table, where they were equilibrated at a pressure of 6 kPa. Afterwards, the samples were equilibrated at pressures of 10, 33, 102 and 1530 kPa in Richards pressure chamber (Klute, 1986), and then dried at 105 °C to constant weight. With the data, the values of macroporosity (tension of 6 kPa), microporosity, bulk density and estimated available water capacity were calculated by considering the water content at tensions of 10 kPa and 1530 kPa, respectively, representing field capacity and permanent wilting point.

To calculate the estimated available water capacity, the water retention curves were fitted to the model of van Genuchten (1980) by the program SWRC (Soil Water Retention Curve) (Dourado-Neto *et al.*, 2001).

With the data an ANOVA was performed and treatments means were compared using Tukey test ($p \leq 0.05$). To assess the influence of the cover plants in the recovery of soil physical attributes over time, the results obtained at 5, 41 and 78 months after starting the experiment were compared using MIXED. All statistical analysis was performed using SAS (1985).

RESULTS AND DISCUSSION

The values of soil chemical variables indicate that the liming and fertilization were more effective in the 0:00 to 0:10 m layer, with little effect in the 0.10-0.20 m layer (Table 2). This occurred due to highly compacted condition of the soil, which limited the incorporation of limestone and fertilizer.

According to CQFS (2004), the data indicate that the pH in the 0:00 to 0:10 m layer is above the

Para T1 y T3 se usaron plántulas espaciadas entre 0.10-0.15 m en el surco y 0.40 m entre surcos. Para T2 y T4 se usaron 200 g y 140 g de semillas por parcela, que corresponden a 50 y 35 kg ha⁻¹, respectivamente. Los resultados de cada tratamiento con gramínea se compararon con los de un suelo testigo, rehabilitado, desnudo, junto a la zona experimental.

Para analizar el efecto del encalado y fertilización después de 78 meses de experimento, se tomaron muestras perturbadas en las capas de 0.00 a 0.10 m y de 0.10 a 0.20 m para determinar: pH del agua, carbono orgánico, calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio (Al), acidez potencial (H+Al), potasio (K), sodio (Na), y fósforo (P), según Tedesco *et al.* (1995). Para determinar densidad aparente (Blake y Hartge, 1986), porosidad total, macroporosidad (Embrapa, 2011), y la capacidad de agua disponible, se tomaron 160 muestras inalteradas en las capas 0.00-0.10 m y 0.10-0.20 m (4 bloques×5 tratamientos×2 repeticiones por parcela×2 capas de suelo) con cilindros de acero (0.030 m altura y 0.0485 m diámetro).

Las muestras inalteradas fueron saturadas con agua por capilaridad por 24 h, y se colocaron en una mesa de tensión, donde se equilibraron a una presión de 6 kPa. Después las muestras se equilibraron a presiones de 10, 33, 102 y 1530 kPa en la cámara de presión Richards (Klute, 1986), y se secaron a 105 °C a peso constante. Con los datos se calcularon los valores de macroporosidad (tensión de 6 kPa), microporosidad, densidad aparente y capacidad de agua disponible estimada, considerando el contenido de agua a tensiones de 10 kPa y 1530 kPa, respectivamente, lo que representa la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente.

Para calcular la capacidad estimada de agua disponible, las curvas de retención de agua se ajustaron al modelo de van Genuchten (1980) con el programa SWRC (Soil Water Retention Curve) (Dourado-Neto *et al.*, 2001).

Con los datos se realizó un ANDEVA y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para evaluar la influencia de las plantas de cobertura para recuperar los atributos físicos del suelo en el tiempo, los resultados obtenidos a 5, 41 y 78 meses después de iniciar el experimento se compararon usando MIXED. Todos los análisis estadísticos se realizaron con SAS (1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de las variables químicas del suelo indican que el encalado y la fertilización fueron más eficaces en la capa de 0.00 a 0.10 m, con poco efecto en la capa de 0.10-0.20 m (Cuadro 2). Esto se debió a la condición altamente compactada del suelo, lo que limitó la incorporación de piedra caliza y fertilizante.

Table 2. Chemical properties of a rehabilitated soil in coal mining with four grasses species (treatments) in 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m layers, after 78 months.**Cuadro 2. Propiedades químicas de un suelo rehabilitado en la minería de carbón con cuatro especies de gramíneas (tratamientos) en las capas de 0.00-0.10 m y 0.10-0.20 m, después de 78 meses.**

Treatments	Water pH	Organic carbon %	Ca	Mg	Al	H+Al	CEC	K	Na	P	
			cmol _c kg ⁻¹						mg kg ⁻¹		
0.00-0.10 m											
T1	7.02	1.01	7.82	4.22	0.00	1.53	13.93	132.94	9.20	21.55	
T2	6.49	0.79	6.63	4.25	0.00	2.05	13.23	109.48	11.50	11.70	
T3	6.69	0.88	6.67	3.99	0.09	2.00	12.99	117.30	9.20	10.95	
T4	5.89	0.84	5.94	3.69	0.22	2.88	12.75	78.20	13.80	4.35	
0.10-0.20 m											
T1	4.58	0.75	4.05	3.53	1.93	9.98	17.73	39.10	18.40	1.40	
T2	5.33	0.74	4.95	3.85	0.60	3.93	12.93	50.83	16.10	2.20	
T3	4.98	0.94	3.95	3.23	1.00	5.23	12.60	39.10	13.80	0.60	
T4	4.60	1.09	4.35	3.83	1.68	9.35	17.77	62.56	18.40	0.90	

T1: *Hemarthria altissima*; T2: *Paspalum notatum*; T3: *Cynodon dactylon*; T4: *Urochloa brizantha*.

reference range for the development of perennial grasses (pH>5.5), as well as the values of Ca and Mg (>4.0 and >1.0 cmol_c kg⁻¹, respectively). The CEC is average (5.1 to 15 cmol_c kg⁻¹), whereas K and P values are high (from 61-120 mg kg⁻¹, and from 9.0-18 mg kg⁻¹ for clay soils, respectively) for the treatments, except P in T4.

Regarding the layer below 0.10 m, pH values are below 5.0 for most of the treatments; nevertheless, the amounts of Ca and Mg are high and those of Al range from low to medium (CQFS, 2004). The CEC is average, the values of K ranging from medium to high, and P values are low (Table 2).

The organic carbon for both layers is low, which is explained by the degradation promoted during the topographic recovery of the area, since carbon losses can be attributed to mechanical mixing of the B with the A horizon. The amounts of carbon (Table 2), nevertheless, improved in relation to the original condition (Table 1).

After 78 months, treatments except T2 (*P. notatum*) showed lower soil density (BD), and higher values of total porosity (TP) and macroporosity (MA) than the control in the recovered topsoil (0.00-0.10 m) (Table 3).

It is common to relate root growth in compacted soil with its density, which is dependent on its textural class (Reinert *et al.*, 2008). For clayey soils the critical limit of BD is 1.30-1.40 Mg m⁻³ (Reichert *et al.*,

Según CQFS (2004), los datos indican que el pH en la capa de 0.00 a 0.10 m está sobre el intervalo de referencia para el desarrollo de gramíneas perennes (pH>5.5), así como los valores de Ca y Mg (>4.0 y >1.0 cmol_c kg⁻¹, respectivamente). La CEC es promedio (5.1 a 15 cmol_c kg⁻¹), mientras que los valores de K y P son altos (61 a 120 mg kg⁻¹, y de 9.0 a 18 mg kg⁻¹ para suelos arcillosos, respectivamente) para los tratamientos, excepto P en T4.

Respecto a la capa debajo de 0.10 m, los valores de pH son menores a 5.0 para la mayoría de los tratamientos; sin embargo, las cantidades de Ca y Mg son altas y los de Al de bajos a medios (CQFS, 2004). La CEC es promedio, los valores de K varían de medio a alto, y los de P son bajos (Cuadro 2).

El carbono orgánico para ambas capas es bajo, lo que se explica por la degradación promovida durante la recuperación topográfica de la zona, ya que las pérdidas de carbono pueden atribuirse a la mezcla mecánica de la B con el horizonte. Las cantidades de carbono (Cuadro 2), sin embargo, mejoraron en relación a la condición original (Cuadro 1).

Después de 78 meses, los tratamientos excepto T2 (*P. notatum*) mostraron menor densidad del suelo (BD), y valores más altos de porosidad total (TP) y macroporosidad (MA) que el testigo en la capa superior del suelo recuperado (0.00-0.10 m) (Cuadro 3).

2007). In the present study, all treatments had values above the critical threshold in both rehabilitated soil layers except *U. brizantha* (T4), which showed BD of 1.37 Mg m^{-3} in the 0.00-0.10 m layer (Table 3). This result may indicate a better adaptation of T4 to the post-mining environment and its efficiency in improving the constructed soil structure, probably because of its aggressive root system, rapid establishment and tolerance to drought periods (Fontanelli *et al.*, 2012).

The high degree of compaction in the 0.10-0.20 m layer is indicated by BD values much higher than 1.40 Mg m^{-3} , TP values below 50 %, and MA values lower than 10 % (Table 3), considered critical to plants growth (Reichert *et al.*, 2007; Tormena *et al.*, 1998; Girardelo *et al.*, 2011).

Soil compaction occurs when an applied soil stress exceeds the strength of the soil, with the increasing vehicular pressures exerting their compactive effect more and more into the subsoil. This subsoil compaction proves to be very persistent (Lipiec *et al.*, 2003). The compaction causes a structural change in the soil, increasing its density and reducing the

Es común relacionar el crecimiento de las raíces en suelo compactado con su densidad, la cual es depende de su clase de textura (Reinert *et al.*, 2008). Para suelos arcillosos el límite crítico de BD es 1.30 a 1.40 Mg m^{-3} (Reichert *et al.*, 2007). En este estudio, todos los tratamientos tuvieron valores sobre el umbral crítico en ambas capas de suelo rehabilitado excepto *U. brizantha* (Cuadro 4) que mostró BD de 1.37 Mg m^{-3} en la capa 0.00-0.10 m (Cuadro 3). Este resultado puede indicar una mejor adaptación del T4 con el entorno posterior a la minería y su eficiencia en mejorar la estructura del suelo rehabilitado, probablemente por su sistema radical agresivo, establecimiento rápido y tolerancia a los períodos de sequía (Fontanelli *et al.*, 2012).

El grado alto de compactación en la capa de 0.10-0.20 m es indicado por valores BD mucho mayores que 1.40 Mg m^{-3} , valores TP menores a 50 %, y valores MA inferiores a 10 % (Cuadro 3), considerados críticos para el crecimiento de las plantas (Reichert *et al.*, 2007; Tormena *et al.*, 1998; Girardelo *et al.*, 2011).

Table 3. Mean values of bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (MA), microporosity (MI) and available water capacity (AWC) of a rehabilitated soil in coal mining with four grasses species (treatments) in 0.00-0.10 m 0.10-0.20 m layers, after 78 months.

Cuadro 3. Valores medios de la densidad aparente (BD), porosidad total (TP), macroporosidad (MA), microporosidad (MI) y capacidad de agua disponible (AWC) de un suelo rehabilitado en la minería de carbón cuatro especies de gramíneas (tratamientos) en las capas de 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m, después de 78 meses.

Treatments	BD Mg m ⁻³	TP	MA	MI	AWC cm ³ cm ⁻³
		%			
0.00-0.10 m layer					
T1	1.44 ab	51.82 a	12.68 a	39.15 a	0.12 a
T2	1.50 a	49.82 a	10.75 a	39.09 a	0.10 a
T3	1.42 ab	51.48 a	13.57 a	37.91 a	0.11 a
T4	1.37 b	51.85 a	13.37 a	38.48 a	0.12 a
Control	1.48	48.15	11.15	37.00	0.13
0.10-0.20 m layer					
T1	1.61 a	44.78 a	8.81 a	35.97 a	0.06 a
T2	1.65 a	47.26 a	8.58 a	38.68 a	0.05 a
T3	1.67 a	43.01 a	7.53 a	35.48 a	0.05 a
T4	1.54 a	47.88 a	10.77 a	37.11 a	0.05 a
Control	1.61	46.46	9.22	37.24	0.07

T1: *Hemarthria altissima*; T2: *Paspalum notatum*; T3: *Cynodon dactylon*; T4: *Urochloa brizantha*; Control: rehabilitated soil without vegetal cover. Means with different letters in a column are statistically different ($p \leq 0.05$) ♦ T1: *Hemarthria altissima*; T2: *Paspalum notatum*; T3: *Cynodon dactylon*; T4: *Urochloa brizantha*; Testigo: suelo rehabilitado sin cubierta vegetal. Medias con diferentes letras en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

total porosity and macroporosity (Stone *et al.*, 2002). According to Neto *et al.* (2008), soils with low values of macropores present serious constraints to plant growth, gas exchange and water infiltration, increasing runoff and, consequently, the risk of hydric erosion.

When compared with the control, treatments T4, T3 and T1 presented lower values of BD and higher TP and MA in the 0.00-0.10 m layer (Table 3). This can be explained by the soil coverage effect, preventing or reducing the direct action of raindrops impact, as well as by the added biomass from the roots and the aerial part of the plants, helping to create an environment more favorable to aggregation (Campos *et al.*, 1999).

The occurrence of improvements in the rehabilitated soil structure due to the presence of cover plants, can also be noted when evaluating the effect of grasses over time (05, 41 and 78 months), with most of the treatments showing positively changes in BD, TP and MA (Table 4).

The lower values of BD and the higher values of MA observed in the 0.00-0.10 m layer after 5 months compared with 41 months (Table 4), are probably the result of the conventional tillage operations performed for starting the experiment. Similar effect, but less pronounced, was observed in the 0.10-0.20 m layer.

The effect of scarification is considered temporary, the length of which being variable according to the soil type (Reichert *et al.*, 2007). Initially, both operations (scarification and tillage) promote soil cultivation with the reduction of BD and increasing of MA; however, natural soil densification occurs with time in the absence of sequential tillage (Vieira and Klein, 2007). The slow establishment of cover plants in the first two years due to successive drought periods could also influenced this result.

From 41 to 78 months BD decreased and MA increased in the 0.00-0.10 m layer of the constructed soil (Table 4). Possibly, after 41 months more active root systems of the plant species studied in the surface layer improved the structural quality of the rehabilitated soil. In agricultural soils under no tillage, BD decreases with the time of adoption of the system (Vieira and Klein, 2007), which is explained by the development of galleries in the soil from the death of the root systems of previous crops (Hickmann *et al.*, 2012). This contributes to

La compactación del suelo se produce cuando una tensión aplicada al terreno excede la resistencia del suelo, con las crecientes presiones vehiculares ejerciendo su efecto de compactación cada vez más en el subsuelo. Esta compactación del subsuelo es muy persistente (Lipiec *et al.*, 2003). La compactación causa un cambio estructural en el suelo, aumentando su densidad y reduciendo la porosidad y macroporosidad total (Stone *et al.*, 2002). Según Neto *et al.* (2008), los suelos con valores bajos de macroporos presentan serias limitaciones para el crecimiento de la planta, el intercambio de gases y la infiltración de agua, aumentando la escorrentía y por tanto, el riesgo de erosión hídrica.

En comparación con el testigo, los tratamientos T4, T3 y T1 presentan valores más bajos de BD y más altos de TP y MA en la capa de 0.00-0.10 m (Cuadro 3). Esto puede explicarse por el efecto de la cobertura del suelo, previniendo o reduciendo la acción directa del impacto de las gotas de lluvia, así como por la biomasa añadida de las raíces y la parte aérea de las plantas, lo que ayuda a crear un entorno más favorable para la agregación (Campos *et al.*, 1999).

La ocurrencia de mejoras en la estructura del suelo rehabilitado debido a la presencia de las plantas de cobertura, también puede notarse al evaluar el efecto de las gramíneas en el tiempo (5, 41 y 78 meses), con la mayoría de los tratamientos mostrando cambios positivos en BD, TP y MA (Cuadro 4).

Los valores más bajos de BD y los más altos de MA observados en la capa de 0.00 a 0.10 m después de 5 meses comparados con 41 meses (Cuadro 4), son probablemente el resultado de las operaciones convencionales de labranza realizadas para instalar el experimento. Un efecto similar, pero menos pronunciado, se observó en la capa de 0.10 a 0.20 m.

El efecto de la escarificación se considera temporal, y su duración varía según el tipo de suelo (Reichert *et al.*, 2007). Inicialmente, las dos operaciones (escarificación y labranza) promueven el cultivo del suelo con la reducción de la BD y el aumento de la MA; sin embargo, la densificación del suelo natural se produce con el tiempo en ausencia de labranza secuencial (Vieira y Klein, 2007). El establecimiento lento de plantas de cobertura en los dos primeros años, debido a los períodos sucesivos de sequía pudo también influir en este resultado.

Table 4. Bulk density, total porosity, macroporosity and microporosity at 5, 41 and 78 months of the experiment with four species of grasses (treatments) in 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m layers of rehabilitated soil.

Cuadro 4. Densidad aparente, porosidad total, macroporosidad y microporosidad a los 5, 41 y 78 meses del experimento con cuatro especies de gramíneas (tratamientos) en las capas de 0.00-0.10 m y 0.10-0.20 m de suelo rehabilitado.

Treatments	Bulk density (Mg m ⁻³)			Total porosity (%)			Macroporosity (%)			Microporosity (%)			
	0.00-0.10 m Layer												
	Months												
	05	41	78	05	41	78	05	41	78	05	41	78	
T1	1.47b	1.55a	1.44b	43.65c	47.71b	51.82a	11.04a	10.96a	12.68a	31.68c	36.70b	39.15a	
T2	1.47b	1.59a	1.50b	43.56c	46.84b	49.82a	11.18a	11.71a	10.75a	32.36b	34.67b	39.09a	
T3	1.45b	1.59a	1.42b	44.76b	46.44b	51.48a	12.94a	10.07b	13.57a	31.84b	36.43a	37.91a	
T4	1.40b	1.66a	1.37b	47.61b	45.73b	51.85a	16.03a	10.37b	13.37a	31.55b	35.38a	38.48a	
							0.10-0.20 m Layer						
T1	1.67a	1.69a	1.61b	41.08b	44.08a	44.78a	6.51a	7.10a	8.81a	34.65a	36.98a	35.97a	
T2	1.66a	1.71a	1.65b	39.42b	45.41a	47.26a	5.05b	8.38a	8.58a	34.35b	37.06a	38.68a	
T3	1.68b	1.77a	1.67b	40.93b	45.05a	43.01a	5.88a	6.31a	7.53a	34.98b	38.75a	35.48a	
T4	1.67a	1.70a	1.54b	46.72a	47.73a	47.88a	8.17b	8.64b	10.77a	35.04a	37.63a	37.11a	

T1: *Hemarthria altissima*; T2: *Paspalum notatum*; T3: *Cynodon dactylon*; T4: *Urochloa brizantha*. Means with different letters in a row are statistically different ($p \leq 0.05$) ♦ T1: *Hemarthria altissima*; T2: *Paspalum notatum*; T3: *Cynodon dactylon*; T4: *Urochloa brizantha*. Medias con diferentes letras en un renglón son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

the increase of water infiltration and diffusion of gases, improving the physical quality of the soil for subsequent crops (Foloni *et al.*, 2006).

In the 0.10-0.20 m layer a slight decrease of the BD and a practically no change of the MA, from 41 to 78 months of the experiment (Table 4), indicates an unfavorable environment for root growth in this layer. The T4 was the only treatment that showed some improvement in MA in the layer for that period, indicating a higher potential of the *U. brizantha* for root growth in compacted layers. Plants modify soil structure mainly when their roots grow into the dense layers, then later die and decay leaving behind pores or channels which are called biopores (Yunusa and Newton, 2003).

Alternating shrinking and swelling and wetting and drying cycles, common to the clay soils, probably played an important role in the process of soil structure recovery in the present study. In agricultural soils, the formation of soil aggregates is dependent upon both abiotic and biotic factors; the former is mainly related to soil clay content and the capacity for natural structure forming processes (Topp *et al.*, 1997). The first aggregation process is always governed by soil shrinkage and results in vertical cracks defining a prismatic structure; repeated wetting-drying cycles would further, by shear strength, induce the formation of blocky and subangular-blocky structure (Seguel and Horn, 2006).

Root penetration is often associated with soil fragmentation as it creates zones of failure. Wetting and drying cycles also influence the extent of soil fragmentation and aggregate formation. Drying produces cracks and induces fracture of aggregates. The drying of soil by the roots may also act synergistically with the aggregate binding material produced in the rhizosphere and increase soil structural stability (Angers and Caron, 1998). According to Bronick and Lal (2005), roots and hyphae enmesh and release organic compounds that act as glue to hold particles together. Particles can be rearranged during enmeshment, whereas wet-dry cycles help to stabilize the aggregates.

In fact, little is known about why some cover and agronomic crops are more effective in structural development than others (Bronick and Lal, 2005). Therefore, research should focus on a better understanding the interaction between rehabilitated

De 41 a 78 meses BD disminuyó y MA aumentó en la capa de 0.00 a 0.10 m del suelo rehabilitado (Cuadro 4). Posiblemente, después de 41 meses los sistemas radicales más activos de las especies vegetales estudiadas en la capa superficial mejoraron la calidad estructural del suelo rehabilitado. En suelos agrícolas bajo siembra directa BD disminuye al momento de adopción del sistema (Vieira y Klein, 2007), lo que se explica por el desarrollo de galerías en el suelo a partir de la extinción de los sistemas radicales de cosechas anteriores (Hickmann *et al.*, 2012). Esto contribuye a aumentar la infiltración de agua y difusión de los gases, mejorando la calidad física del suelo para los cultivos posteriores (Foloni *et al.*, 2006).

En la capa de 0.10-0.20 m una ligera disminución de la BD y prácticamente ningún cambio de MA, de 41 a 78 meses del experimento (Cuadro 4), indican un ambiente desfavorable para el crecimiento de raíces en esta capa. El T4 es el único tratamiento que mostró cierta mejoría en MA en esa capa en ese período, lo que indica un mayor potencial de la *U. brizantha* para el crecimiento de las raíces en las capas compactadas. Las plantas modifican la estructura del suelo principalmente cuando sus raíces crecen en las capas densas, y más tarde mueren y se descomponen dejando poros o canales llamados bioporos (Yunusa y Newton, 2003).

Ciclos alternativos de contracción y expansión, humedad y secado, común a los suelos arcillosos, probablemente tuvieron una función importante en el proceso de recuperación de la estructura del suelo en el presente estudio. En suelos agrícolas, la formación de los agregados del suelo depende de factores abióticos y bióticos; el primero está relacionado principalmente con el contenido de arcilla del suelo y la capacidad para los procesos de formación de la estructura natural (Topp *et al.*, 1997). El primer proceso de agregación está siempre regido por la contracción del suelo y resulta en grietas o verticales que definen una estructura prismática; ciclos de secado y mojado repetidos, por la fuerza al corte, inducirían aún más la formación de estructura en bloques y bloques subangulares (Seguel y Horn, 2006).

La penetración de raíces frecuentemente se asocia con la fragmentación del suelo, ya que crea zonas de falla. Los ciclos de secado y mojado también influyen en el grado de fragmentación del suelo y la formación de agregados. El secado produce grietas e induce

mine soils and plant root systems in order to improve the performance of plants with the potential to recover these degraded areas.

CONCLUSION

The limitations for plant growth are due more to physical than to chemical conditions of the rehabilitated soil, especially in the 0.10-0.20 layer.

The process of rehabilitation of coal mine areas is slow due to the high degree of degradation that occurred during the extraction of coal and the topographic recovery of the area, adversely affecting the structural quality of the soils. However, the assessed grasses showed potential to reclaim these areas, since they improved in the values of the soil attributes over time, mainly in the 0.00-0.10 m layer.

After 78 months of evaluation, *Urochloa brizantha* showed the higher potential to recover the physical properties of the rehabilitated mine soils.

LITERATURE CITED

- Alves, M. C., e M. Souza Z. 2011. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 32: 2505-2516.
- Alves, M. C., G. A. S. Suzuki, L., e E. A. S. Suzuki L. 2007. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. *Rev. Bras. Ciência Solo* 31: 617-625.
- Amaral, C. S., B. Silva E., G. Amaral W., e O. Nardis B. 2012. Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito. *Biosci. J.* 28: 130-141.
- Angers, D. A., and J. Caron. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 42: 55-72.
- Avaretto, N., A. Moraes, C. V. Motta, A., e M. S. Prevedello B. 2000. Efeito da revegetação e da adubação de área degradada na fertilidade do solo e nas características da palhada. *Pesq. Agropec. Bras.* 35: 289-297.
- Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. *In*: Klute, A. *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. pp: 363-375.
- Bronick, C. J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Campos, B. C., J. Reinert, D., R. Nicolodi, e C. Cassol L. 1999. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 23:383-391.
- CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. 2004. *Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. SBCS-NRS: Brasil, 10 ed., Porto Alegre. 400 p.

la fractura de los agregados. El secado del suelo por las raíces también puede actuar sinérgicamente con el material de unión del agregado producido en la rizosfera y aumentar la estabilidad estructural del suelo (Angers y Caron, 1998). Según Bronick y Lal (2005), las raíces y las hifas atrapan y liberan compuestos orgánicos que actúan como pegamento para mantener las partículas juntas. Las partículas pueden ser reorganizadas durante el involucramiento, mientras que los ciclos de secado y mojado ayudan a estabilizar los agregados.

De hecho, se sabe poco acerca de por qué algunos cultivos agronómicos y de cobertura son más eficaces en el desarrollo estructural que otros (Bronick y Lal, 2005). Por lo tanto, la investigación debería centrarse en entender mejor la interacción entre suelos rehabilitados de las minas y los sistemas radicales de plantas para mejorar el rendimiento de plantas con potencial de recuperar estas áreas degradadas.

CONCLUSIONES

Las limitaciones para el crecimiento de la planta se debe más a las condiciones físicas que químicas del suelo rehabilitado, especialmente en la capa de 0.10 a 0.20 m.

El proceso de rehabilitación de las zonas mineras de carbón es lento debido al grado alto de degradación producido durante la extracción de carbón y la recuperación topográfica de la zona, lo que afecta negativamente a la calidad estructural de los suelos. Sin embargo, las gramíneas evaluadas presentaron potencial para recuperar estas áreas, ya que mejoraron los valores de los atributos del suelo con el tiempo, principalmente en la capa de 0.00 a 0.10 m.

Después de 78 meses de evaluación, *Urochloa brizantha* mostró el mayor potencial para recuperar las propiedades físicas de los suelos rehabilitados de las minas.

—Fin de la versión en Español—



- Dourado neto, D., R. Nielsen, D., W. Hopmans, J., K. Reichardt, and O. S. Bacchi O. 2000. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.0). *Sci. Agric.* 57: 191-192.
- Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2011. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS. 230 p.

- Foloni, J. S. S., L. Lima S., e T. Bül L. 2006. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 30: 49-57.
- Fontaneli, R. S., S. Fontaneli R., P. Santos H., F. Mariani, C. Pivotto A., R. Signor L. e D. Zanella. 2012. Gramíneas forrageiras perenes de verão. *In: Fontaneli, R. S., P. Santos H., e S. Fontaneli R. (eds). Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul-Brasileira. 2º Ed. Brasília, D.F. pp: 247-295.*
- Girardelo, V. C., J. C. Amado T., S. Nicoloso R., A. N. Hörbe T., O. Ferreira A., M. Tabaldi F., e E. Lanza Nova M. 2011. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. *Rev. Bras. Ciência Solo* 35: 2115-2126.
- Hickmann, C., M. Costa L., E. G. R. Schaefer C., B. A. Fernandes R., e L. T. Andrade C. 2012. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. *Rev. Caatinga* 25: 128-136.
- Horn, R., H. Domzal, and C. van Ouwerkerk. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.* 35: 23-36.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *In: Black, C. A. Methods of Soil Analysis. I. Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. pp: 635-662.*
- Lipiec, J., J. Arvidsson, and E. Murer. 2003. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil Till. Res.* 73: 15-29.
- Neto, A. L., A. Albuquerque J., A. Almeida J., L. Mafra A., C. Medeiros J. e A. Alberton. 2008. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Rev. Bras. Ciência Solo* 32: 1379-1388.
- Reichert, J. M., E. A. S. Suzuki L. e J. Reinert D. 2007. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *In: Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Soc. Bras. Ciência Solo. pp: 49-134.*
- Reinert, D. J., A. Albuquerque J., M. Reichert J., C. Aita, e M. C. Andrada M. 2008. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Rev. Bras. Ciência Solo* 32: 1805-1816.
- Rodrigues, G. B., L. Maltoni K., e M. R. Cassiolato, A. 2007. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 11: 73-80.
- SAS. Statistical Analysis System. 1985. User's Guide. 5th ed. Cary, N. C.: SAS Institute Inc.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169: 221-232.
- Silva, G. P., P. F. Fontes M., M. Costa L., e H. A. Venegas V. 2006. Potencialidade de plantas para revegetação de estéréis e rejeito da mineração de ferro da mina de alegria, Mariana-MG. *Pesq. Agrop. Trop.* 36: 165-172.
- Silva, L. C. R., e S. Correa R. 2010. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no distrito federal. *Rev. Bras. Ciência Solo* 34: 1435-1443.
- Stone, L. F., M. Guimarães C., e A. A. Moreira J. 2002. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 6: 207-212.
- Tedesco, M. J., C. Gianello, e A. Bissani C. 1995. Análises de Solos, Plantas e outros Materiais. 174 p.
- Topp, G. C., D. Reynolds W., J. Cook, F., M. Kirby J., and R. Carter, M. 1997. Physical attributes of soil quality. *In: Gregorich, E. G., and R. M. Carter. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25, Elsevier, New York, NY. pp: 21-58.*
- Tormena, C. A., P. Silva A., e D. Libardi P. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciência Solo* 22: 573-581.
- van Genuchten, M. T. H. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Vieira, M. L., e A. Klein V. 2007. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 31: 1271-1280.
- WRB. World Reference Base for Soil Resources, 2006. A framework for international classification, correlation and communication. Intern. World Soil Resources Reports 103, FAO, Rome. 128 p.
- Yunusa, I. A. M., and J. Newton P. 2003. Plants for amelioration of subsoil constraints and hydrological control: the primer-plant concept. *Plant and Soil* 257: 261-281.