

GRAMÍNEAS PERENES E SUA RELAÇÃO COM A RECUPERAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO DEGRADADO CONSTRUÍDO

Lizete Stumpf, Eloy Antonio Pauletto, Luiz Fernando Spinelli Pinto, Flavia Fontana Fernandes, Tiago Stumpf da Silva, Jordano Vaz Ambus, Gabriel Furtado Garcia, Leonir Aldrighi Dutra Junior e Tiago Scheunemann

RESUMO

Os solos construídos são solos pedologicamente jovens cuja recuperação dos atributos físico-químico-biológicos depende da vegetação da área minerada. O objetivo do trabalho foi analisar o desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua relação na recuperação da qualidade física de um solo construído após mineração de carvão. O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão localizada no Sul do Brasil. As espécies vegetais avaliadas foram *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum* cv. *Pensacola*, *Cynodon dactylon* cv *Tifton* e *Urochloa brizantha*. Foram coletados 16 monólitos de solo para determinação dos atributos radiculares das espécies, 96 amostras com estrutura preservada para a determinação dos atributos físicos e 48 amostras com estrutura não preservada para a determinação dos atributos químicos. O desenvolvimento, em profundida-

de, das raízes das gramíneas é afetado pela alta densidade do solo e resistência à penetração, baixa porosidade total e macroporosidade, baixa concentração de bases trocáveis e pH ácido, advindos do processo de construção do solo pelo uso de máquinas pesadas e a presença de estêreis contaminados por pirita. A menor densidade e resistência do solo à penetração e a maior macroporosidade apresentadas na camada de 0-0,10m em relação às camadas subjacentes foram proporcionadas pela maior presença de raízes das gramíneas nesta camada do solo construído. A *Urochloa brizantha* se destaca pela sua maior densidade, volume, área e comprimento radicular, principalmente na camada abaixo de 0-0,10m, apresentando assim um maior potencial em recuperar os atributos físicos de áreas degradadas, principalmente em profundidade.

Introdução

Solos construídos são fundamentalmente antropogênicos (Kämpf *et al.*, 1997), pois são formados por materiais e procedimentos determinados pela ação humana. A construção do solo após a mineração de carvão a céu aberto abrange a remoção dos horizontes do solo original e das rochas, para posteriormente extrair os bancos de carvão. A recomposição topográfica da área minerada ocorre com o

retorno do material estéril (mistura de rochas e carvão não aproveitados) na cava aberta para a retirada do carvão, seguida da reposição de uma camada de solo (horizonte A e/ou B), retirada anteriormente à lavra do carvão, originando assim o 'solo construído'.

Os solos construídos são, portanto, considerados solos pedologicamente jovens cuja recuperação dos atributos físico-químico-biológicos depende da intensidade da repo-

sição vegetal na área minerada (Mukhopadhyay *et al.*, 2014). Em solos construídos na China, Zhang *et al.* (2015) observaram que após cinco anos de vegetação, houve um aumento do conteúdo de matéria orgânica e melhorias nas propriedades físicas do novo solo. Nos Estados Unidos, Akala e Lal (2001) também observaram o desenvolvimento de horizontes em solos construídos em um período relativamente curto de tempo, com acúmulo de carbono orgânico

após cinco e dez anos da construção do solo. Por sua vez, Krümmelbein e Raab (2012) observaram em um solo construído na Alemanha, que os atributos físicos eram muito variáveis nos primeiros quatro anos de vegetação, todavia, o uso de espécies perenes foi indicado por melhorar a formação da estrutura do novo solo devido ao seu enraizamento profundo.

Na literatura, as raízes das plantas são consideradas importantes aliadas na recupe-

PALAVRAS-CHAVE / Áreas degradadas / *Cynodon dactylon* / *Hemarthria altissima* / *Paspalum notatum* / *Urochloa brizantha* /

Recebido: 03/03/2016. Modificado: 16/01/2017. Aceito: 18/01/2017.

Lizete Stumpf. Agrônoma, Mestre e Doutora em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Brasil. Professora, Universidade Federal de Rio Grande (FURG), Brasil. Endereço: Bacharelado em Agroecologia, FURG. Campus São Lourenço do Sul, São Lourenço do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. e-mail: zete.stumpf@gmail.com

Eloy Antonio Pauletto. Agrônomo, UFPel, Brasil. Mestre e

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Brasil. Professor, UFPel, Brasil.

Luiz Fernando Spinelli Pinto. Geólogo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS), Brasil. Mestre em Ciências Físicas, Hirosaki University, Japón. Mestre e Doutor em Ciência do Solo, UFRGS, Brasil. Professor, UFPel, Brasil.

Flavia Fontana Fernandes. Engenheira Agrônoma, UFPel, Brasil. Mestre e Doutora em Ciências do Solo, UFRGS, Brasil. Professora, UFPel, Brasil.

Tiago Stumpf da Silva. Agrônomo, UFPel, Brasil. Mestre em Ciência do Solo, UFRGS, Brasil.

Jordano Vaz Ambus. Agrônomo, UFPel, Brasil. Mestre em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Gabriel Furtado Garcia. Agrônomo, UFPel, Brasil. Mestre em Ciência do Solo, UFRGS, Brasil.

Leonir Aldrighi Dutra Junior. Técnico Profissional em Agropecuária, Conjunto Agrotécnico Visconde da Graça (CAVG), Brasil. Graduando de Agronomia, UFPel, Brasil.

Tiago Scheunemann. Técnico Profissional em Agropecuária, CAVG, Brasil. Agrônomo, UFPel. Mestrando em Entomologia, UFPel Brasil.

PERENNIAL GRASSES AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE RECOVERY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF A DEGRADED CONSTRUCTED SOIL

Lizete Stumpf, Eloy Antonio Pauletto, Luiz Fernando Spinelli Pinto, Flavia Fontana Fernandes, Tiago Stumpf da Silva, Jordano Vaz Ambus, Gabriel Furtado Garcia, Leonir Aldrighi Dutra Junior and Tiago Scheunemann

SUMMARY

Constructed soils are pedologically young soils whose recovery of physical-chemical-biological attributes depends on the re-vegetation of the mined area. The objective of the work was to analyze the root development of perennial grasses and their relationship in the recovery of physical attributes of a constructed soil after coal mining. The study was conducted in a coal mining area located in Southern Brazil. The evaluated plant species were *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum* cv. *Pensacola*, *Cynodon dactylon* cv. *Tifton*, and *Urochloa brizantha*. Sixteen soil monoliths were collected for determination of root attributes, 96 undisturbed soil samples for determination of physical attributes and 48 disturbed samples for determination of chemical attributes. The development of grass roots in

the soil deeper layers are affected by the high soil bulk density and penetration resistance, low porosity and macroporosity, low concentration of exchangeable base cations and acidic pH, arising from the soil construction process with the use of heavy machinery and the presence of barren land contaminated with pyrite. The lower bulk density and soil resistance to penetration and higher macroporosity of the 0-0.10m soil layer in relation to the underlying layers were due to the greater abundance of grass roots in this layer. *Urochloa brizantha* stands out for its greater root density, volume, area and length, especially in the layer below 0 to 0.10m, thus presenting a greater potential for the recovery of the physical attributes of the degraded soil below the surface layer.

GRAMÍNEAS PERENNES Y SU RELACIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UN SUELO DEGRADADO CONSTRUIDO

Lizete Stumpf, Eloy Antonio Pauletto, Luiz Fernando Spinelli Pinto, Flavia Fontana Fernandes, Tiago Stumpf da Silva, Jordano Vaz Ambus, Gabriel Furtado Garcia, Leonir Aldrighi Dutra Junior y Tiago Scheunemann

RESUMEN

Los suelos construidos son suelos pedológicamente jóvenes cuya recuperación de los atributos físico-químico-biológicos depende de la vegetación del área de minería. El objetivo del trabajo fue analizar el desarrollo radicular de gramíneas perennes y su relación en la recuperación de la calidad física de un suelo construido post minería de carbón. El estudio fue realizado en un área de minería de carbón localizada en el Sur del Brasil. As especies vegetales evaluadas fueron *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum* cv. *Pensacola*, *Cynodon dactylon* cv. *Tifton* e *Urochloa brizantha*. Fueron recolectados 16 monolitos de suelo para determinación de los atributos radiculares de las especies, 96 muestras con estructura preservada para la determinación de los atributos físicos y 48 muestras con estructura no preservada para la determinación de los atributos químicos. El desarrollo,

en profundidad, de las raíces de las gramíneas es afectado por la alta densidad del suelo y resistencia a la penetración, baja porosidad total y macro porosidad, baja concentración de bases cambiables y pH ácido, derivados del proceso de construcción del suelo por el uso de máquinas pesadas y la presencia de estériles contaminados por pirita. La menor densidad y resistencia del suelo a la penetración y la mayor macro porosidad presentadas en la capa de 0-0,10m en relación a las capas subyacentes fueron proporcionadas por la mayor presencia de raíces de las gramíneas en esta capa del suelo construido. La *Urochloa brizantha* se destaca por su mayor densidad, volumen, área y longitud radicular, principalmente en la capa debajo de 0-0,10m, presentando así un mayor potencial en recuperar los atributos físicos de áreas degradadas, principalmente.

ração dos solos agrícolas (Six *et al.*, 2004; Crispim *et al.*, 2005; Debiasi *et al.*, 2008; Reinert *et al.*, 2008; Ralisch *et al.*, 2010; Lima *et al.*, 2012) e dos solos construídos (Izquierdo *et al.*, 2005; Sourkova *et al.*, 2005; Wick *et al.*, 2009; Amaral *et al.*, 2012; Stumpf *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015), apesar da maioria dos trabalhos não apresentarem medições diretas da biomassa subterrânea.

Mediante a hipótese de que plantas de cobertura podem interferir na qualidade física de solos degradados o objetivo do

trabalho foi analisar o desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua relação na recuperação da qualidade física de um solo construído após mineração de carvão.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma área degradada pela mineração de carvão, localizada em Candiota, cidade da região sul do Brasil com as coordenadas 31°33'56"S e 53°43'30"O.

O experimento com diferentes espécies vegetais (gramíneas e leguminosas) solteiras e consorciadas foi instalado em

novembro/dezembro de 2003, em 84 parcelas de 20m² (5×4m), em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. As espécies vegetais foram implantadas em solo recentemente construído, constituído predominantemente do horizonte B de um Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006), tendo como características a classe textural argilosa, cor avermelhada (2,5YR 3,5/6) e baixo teor de matéria orgânica (Tabela I).

Devido às leguminosas (*Lotus pedunculatus* cv. makú e *Arachis pintoii*) não se estabelecerem na área, foram

estudados os tratamentos com gramíneas em cultivo solteiro: *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard, *Paspalum notatum* Flügge, cv. *Pensacola*, *Cynodon dactylon* (L.) Pers. cv. *Tifton* e a *Urochloa brizantha* (Hochst.) Stapf.

Em face da área se apresentar extremamente compactada devido à intensa circulação de maquinaria pesada (trator de esteira modelo D&T Caterpillar® com 38Mg e caminhões carregados com ~20Mg de solo), o solo construído foi inicialmente escarificado a uma profundidade média de 0,15m, corrigido o pH com

TABELA I
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DA CAMADA SUPERFICIAL DO SOLO CONSTRUÍDO ANTERIOR À INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

pH em água	Matéria orgânica	Ca	Mg	Al	Acidez potencial	CTC	K	Na	P	Areia	Silte	Argila
	%			---- cmol _c ·kg ⁻¹ ----			---- mg·kg ⁻¹ ----			---- g·kg ⁻¹ ----		
5,60	1,15	2,65	2,11	1,28	3,80	8,69	27,66	11,64	1,23	315	209	476

10,4Mg·ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 100%) e realizada a adubação com 900kg·ha⁻¹ de NPK 5-20-20, com base na análise do solo. Adubações subsequentes foram realizadas anualmente com 250Kg·ha⁻¹ de NPK 5-30-15 e 250kg·ha⁻¹ de sulfato de amônio.

Em julho de 2012 foram coletadas 96 amostras de solo com estrutura preservada, em cilindros de aço (0,050m de altura e 0,047m de diâmetro) utilizando o método do macaco hidráulico (Pedrotti *et al.*, 2001), para a determinação da densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) (Embrapa 2011), e 48 amostras com estrutura não preservada, para a caracterização química (pH em água 1:1; teores de Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1mol·l⁻¹ e determinados no espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg) ou por titulação com NaOH (Al); acidez potencial extraída com acetato de cálcio a pH 7 e determinada por titulação com NaOH (Embrapa, 2011). Com base nos resultados das análises foi calculada a capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m). Foi determinado também o teor de carbono orgânico (CO) pelo método de combustão Walkley-Black, segundo Tedesco *et al.* (1995). A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi medida em 48 pontos amostrais, até a profundidade de 0,30m, utilizando o método do penetrômetro de impacto (Stolf, 1991).

A amostragem de raízes das gramíneas foram realizadas pelo método do monólito (Böhm, 1979), nas dimensões de 0,40m de comprimento × 0,30m de altura × 0,035m de

largura, com o auxílio de placas com pregos, totalizando 16 placas de pregos (quatro repetições por tratamento). Após a coleta, os monólitos foram embalados com filme plástico e encaminhados ao laboratório, para o procedimento de lavagem e separação das raízes.

A lavagem consistiu em saturar a placa por 24h em solução de NaOH 0,2mol·l⁻¹ para dispersar o solo e facilitar a lavagem das raízes e, após este período, estas foram lavadas com água corrente ou jatos leves de água para retirada do solo da placa. Os pregos permitiram uma adequada fixação das raízes no momento da lavagem, o que também foi obtido com o uso de uma malha de metal no fundo e na frente da placa. Finalizado o processo de lavagem, as raízes distribuídas no monólito foram separadas por camadas (0-0,10m, 0,10-0,20m e 0,20-0,30m), cortadas e lavadas em uma peneira com abertura de 1mm, armazenadas em sacos plásticos e refrigeradas a uma temperatura de 2°C. Posteriormente, as raízes foram digitalizadas em scanner HP Scanjet 3570C para determinação do volume radicular (VR), comprimento radicular (CR), área radicular (AR)

e diâmetro médio radicular (DMR), através do Software SAFIRA. Após o escaneamento, as raízes foram secas em estufa a 65°C por um período de 72h, para obtenção da massa seca de raízes. Pela relação dos valores de massa seca de raízes e o volume de solo que estas ocupavam, obteve-se a densidade radicular (DR) de cada camada avaliada.

Em todos os monólitos coletados, fez-se a medição da espessura da camada de solo e de estéril, conforme apresentado na Tabela II.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, havendo efeito de tratamento, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (p<0,05). A relação entre as variáveis de raiz e de solo foi avaliada por meio da correlação de Pearson (p<0,05). Todas as análises foram realizadas por meio do software Sigmaplot (2004).

Resultados e Discussão

Nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m a *Urochloa brizantha* apresentou a maior DR em relação às demais espécies, bem como apresentou o maior VR, CR e AR em relação ao

Paspalum notatum e *Cynodon dactylon* (Tabela III). Conseqüentemente, o solo sob este tratamento apresentou a menor Ds, a maior PT e Ma em relação aos demais tratamentos até a profundidade de 0,20m (Tabela IV). Este resultado concorda com Fidalski *et al.* (2009), Chiorderoli *et al.* (2012) e Lima *et al.* (2015), que atribuíram, em solos agrícolas, a redução da Ds e o incremento da PT e Ma até a profundidade de 0,20m ao sistema radicular da *Urochloa brizantha*, considerando-a uma boa alternativa para uso no manejo preventivo da compactação ou na recuperação de solos compactados.

A maior concentração dos atributos radiculares das espécies estudadas na camada de 0-0,10m em relação às camadas inferiores (Tabela III) é uma característica natural da maioria das gramíneas (Jackson *et al.*, 1996; Guenni *et al.*, 2002; Peek *et al.*, 2005). Todavia, os valores de Ds>1,40Mg·m⁻³, Ma<0,10m³·m⁻³ e RP>2MPa abaixo da camada de 0-0,10m (Tabela IV), considerados restritivos para a maioria das culturas agrícolas em solos argilosos (Reichert *et al.*, 2003, 2009a; Girardelo *et al.*, 2011; Otto *et al.*, 2011;

TABELA II
ESPESSURA DA CAMADA DE SOLO E ESTÉRIL PRESENTE NOS DIFERENTES BLOCOS E TRATAMENTOS DO SOLO CONSTRUÍDO EM CANDIOTA, ATÉ A PROFUNDIDADE DE 0,30m

Espessura	Bloco	Tratamentos			
		<i>H. altíssima</i>	<i>P. notatum</i>	<i>C. dactylon</i>	<i>U. brizantha</i>
Camada de solo	I	0,30m	0,18m	0,30m	0,17m
Camada de estéril		Ausente	0,12m	Ausente	0,13m
Camada de solo	II	0,30m	0,30m	0,30m	0,30m
Camada de estéril		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Camada de solo	III	0,20m	0,30m	0,25m	0,30m
Camada de estéril		0,10m	Ausente	0,05m	Ausente
Camada de solo	IV	0,20m	0,30m	0,20m	0,20m
Camada de estéril		0,10m	Ausente	0,10m	0,10m

TABELA III
VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE RADICULAR (DR), VOLUME RADICULAR (VR), ÁREA RADICULAR (AR), COMPRIMENTO RADICULAR (CR) E DIÂMETRO MÉDIO RADICULAR (DMR) DE QUATRO GRAMÍNEAS NAS CAMADAS DE 0-0,10m; 0,10-0,20m E 0,20-0,30m DE UM SOLO CONSTRUÍDO APÓS 103 MESES DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Tratamentos	DR kg·m ⁻³	VR m ³ ·m ⁻³	AR m ² ·m ⁻³	CR m·m ⁻³	DMR Mm
Camada de 0-0,10m					
<i>H. altissima</i>	7,26 ±3,54 b	0,023 ±0,010 ab	136,25 ±50,66 ab	51724 ±15001 ab	0,32 ±0,01 ns
<i>P. notatum</i>	2,78 ±2,12 c	0,008 ±0,006 b	59,82 ±42,20 b	24497 ±15721 b	0,32 ±0,02 ns
<i>C. dactylon</i>	4,26 ±0,89 bc	0,011 ±0,003 b	69,62 ±21,67 b	27576 ±9934 b	0,32 ±0,01 ns
<i>U. brizantha</i>	13,29 ±0,85 a	0,032 ±0,009 a	193,11 ±57,59 a	72093 ±21694 a	0,31 ±0,01 ns
Camada de 0,10-0,20m					
<i>H. altissima</i>	2,71 ±1,63 b	0,010 ±0,004 ab	63,01 ±15,80 ab	25226 ±4156 ab	0,32 ±0,02 ns
<i>P. notatum</i>	0,87 ±0,14 b	0,002 ±0,000 b	17,21 ±7,53 b	7830 ±1000 c	0,31 ±0,01 ns
<i>C. dactylon</i>	2,01 ±1,18 b	0,008 ±0,003 b	45,03 ±18,64 b	17598 ±6557 bc	0,32 ±0,01 ns
<i>U. brizantha</i>	6,00 ±1,67 a	0,017 ±0,007 a	102,71 ±40,29 a	37876 ±15086 a	0,32 ±0,03 ns
Camada de 0,20-0,30m					
<i>H. altissima</i>	0,74 ±0,20 ns	0,004 ±0,001 ns	25,00 ±10,24 ns	11038 ±6355 ns	0,33 ±0,05 ns
<i>P. notatum</i>	0,81 ±0,66 ns	0,002 ±0,002 ns	17,95 ±10,95 ns	7840 ±4611 ns	0,31 ±0,02 ns
<i>C. dactylon</i>	0,60 ±0,33 ns	0,002 ±0,001 ns	16,02 ±8,44 ns	8024 ±4605 ns	0,32 ±0,03 ns
<i>U. brizantha</i>	1,24 ±0,72 ns	0,003 ±0,002 ns	23,79 ±12,57 ns	9940 ±5588 ns	0,35 ±0,06 ns

Letras iguais na coluna não diferem entre si (teste deTukey; p<0,05); ns: não significativo.

TABELA IV
VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DO SOLO (Ds), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (Ma), MICROPOROSIDADE (Mi), RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP) E TEOR CARBONO ORGÂNICO (CO) NAS CAMADAS DE 0-0,10m; 0,10-0,20m E 0,20-0,30m DE UM SOLO CONSTRUÍDO SOB CULTIVO DE QUATRO GRAMÍNEAS APÓS 103 MESES DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Tratamentos	Ds --- kg·dm ⁻³ ---	PT	Ma --- m ³ ·m ⁻³ ---	Mi	RP --- kPa ---	CO --- g·kg ⁻¹ ---
Camada de 0-0,10m						
<i>H. altissima</i>	1,40 ±0,08 ab	0,422 ±0,05 b	0,087 ±0,05 b	0,335 ±0,02 ns	2,12 ±0,67 ab	8,39 ±1,43 ns
<i>P. notatum</i>	1,45 ±0,07 b	0,406 ±0,03 b	0,086 ±0,02 b	0,320 ±0,01 ns	2,52 ±0,56 a	7,67 ±2,16 ns
<i>C. dactylon</i>	1,30 ±0,05 bc	0,467 ±0,02 ab	0,151 ±0,03 a	0,316 ±0,01 ns	1,41 ±0,44 b	8,37 ±1,84 ns
<i>U. brizantha</i>	1,22 ±0,20 c	0,491 ±0,06 a	0,152 ±0,09 a	0,339 ±0,04 ns	1,92 ±0,46 ab	10,37 ±2,53 ns
Camada de 0,10-0,20m						
<i>H. altissima</i>	1,57 ±0,05 a	0,382 ±0,02 b	0,053 ±0,04 b	0,330 ±0,03 ns	4,39 ±1,49 b	5,90 ±0,24 b
<i>P. notatum</i>	1,56 ±0,09 a	0,368 ±0,03 b	0,035 ±0,02 b	0,333 ±0,02 ns	5,92 ±1,18 a	6,96 ±3,75 ab
<i>C. dactylon</i>	1,59 ±0,06 a	0,384 ±0,02 b	0,053 ±0,02 b	0,331 ±0,02 ns	5,04 ±1,27 ab	4,81 ±0,72 b
<i>U. brizantha</i>	1,36 ±0,21 b	0,424 ±0,07 a	0,114 ±0,09 a	0,328 ±0,03 ns	4,66 ±1,52 ab	8,35 ±1,54 a
Camada de 0,20-0,30m						
<i>H. altissima</i>	1,54 ±0,12 ns	0,399 ±0,02 ns	0,034 ±0,01 ns	0,364 ±0,03 ns	4,31 ±1,08 ns	10,83 ±5,92 ns
<i>P. notatum</i>	1,56 ±0,09 ns	0,397 ±0,04 ns	0,023 ±0,01 ns	0,374 ±0,04 ns	5,36 ±1,94 ns	8,16 ±4,84 ns
<i>C. dactylon</i>	1,61 ±0,06 ns	0,380 ±0,03 ns	0,052 ±0,04 ns	0,329 ±0,03 ns	4,24 ±1,62 ns	6,80 ±5,27 ns
<i>U. brizantha</i>	1,56 ±0,07 ns	0,376 ±0,06 ns	0,023 ±0,02 ns	0,353 ±0,05 ns	4,06 ±1,77 ns	9,48 ±3,65 ns

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si (teste deTukey; p<0,05). ns: não significativo.

Baquero *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2013; Girardelo *et al.*, 2014), podem ter influenciado no menor desenvolvimento radicular das espécies em profundidade. Maior concentração de raízes de diferentes gramíneas na superfície do solo em razão da presença de condições adversas existentes em profundidade também foi observada

por diversos autores (Silva *et al.*, 2006; Bonfim-Silva *et al.*, 201; Silva *et al.*, 2014; Nunes *et al.* (2015).

A presença de camadas compactadas em profundidade, frequentemente observadas em solos construídos, deve-se à intensa utilização de máquinas pesadas durante a recomposição topográfica do novo solo,

como já relatado por Neto *et al.* (2008), Wick *et al.* (2009), Sheoran *et al.* (2010), Borůvka *et al.* (2012), Stumpf *et al.* (2014) e Sena *et al.* (2015). No presente estudo, a compactação subsuperficial é evidenciada através dos valores de densidade crítica estimados pela a equação de Reichert *et al.* (2009b; Tabela V). Isto é,

após 103 meses de reintrodução da vegetação, as densidades críticas restritivas às raízes (DcRest) das diferentes espécies, na camada de 0-0,10m, foram superiores às observadas neste estudo, que variaram de 1,22 a 1,45Mg·m⁻³. Por outro lado, nas camadas de 0,10-0,20m e 0,20-0,30m as DcRest foram inferiores às Ds encon-

TABELA V
DENSIDADE CRÍTICA RESTRITIVA AO CRESCIMENTO RADICULAR (DcRest) DE DIFERENTES GRAMÍNEAS, NAS CAMADAS DE 0-0,10; 0,10-0,20 E 0,20-0,30m DE UM SOLO CONSTRUÍDO, UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE REICHERT *et al.* (2009 b)*

Camada	Densidade crítica (Mg·m ⁻³)			
	<i>H. altissima</i>	<i>P. notatum</i>	<i>C. dactylon</i>	<i>U. brizantha</i>
0-0,10m	1,53	1,54	1,54	1,54
0,10-0,20m	1,53	1,51	1,53	1,52
0,20-0,30m	1,55	1,51	1,51	1,56

*DcRest= -0,00078 argila + 1,83803.

tradas nos diferentes tratamentos, exceto para *U. brizantha* (Tabela V).

Com relação ao volume de solo ocupado pelas raízes na camada arável, Anghinoni e Meurer (1999) afirmam que este valor é <1%. Neste estudo, entretanto, o VR observados respectivamente nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m, foram de 3,2 e 1,7% para *U. brizantha*, de 2,3 e 1% para *H. altissima*, de 1,1 e 0,8% para *C. dactylon* e de 0,8 a 0,2% para *P. notatum* (Tabela III), evidenciando a presença da condição física do solo inadequada abaixo dos 0,10m, com a concentração das raízes na camada superficial.

Por outro lado, os maiores valores de DR, VR, CR e AR apresentado por todas as espécies na camada de 0-0,10m

(Tabela III), somados à deposição de resíduos vegetais na superfície, conforme observação feita a campo, contribuíram para a obtenção dos maiores teores de CO na camada de 0-0,10m em relação à de 0,10-0,20m (Tabela IV). O principal input de matéria orgânica no solo se dá pela decomposição dos resíduos da parte aérea e raízes (Izquierdo *et al.*, 2005). Por sua vez, embora os teores de CO não apresentem diferença estatística entre as espécies vegetais estudadas nas camadas de 0-0,10m e 0,20-0,30m, verifica-se que os teores de CO na camada de 0,20-0,30m são superiores aos da camada 0-0,10m (Tabela IV). Todavia, na camada de 0-0,10m o teor de CO é proveniente da maior presença de raízes (Tabela III) e da deposição de

resíduos da parte aérea. Na camada de 0,20-0,30m, o relativamente elevado teor de CO deve-se, possivelmente, à presença de fragmentos de carvão no estéril, conforme mostrado na Tabela II. Elevados teores de carbono em estéreis também foram observados por Silva (2012) e Bitencourt (2014). No entanto, o carbono presente nos estéreis tem limitada aplicação como condicionador do solo, pois apresenta maior caráter aromático, teor carboxílico inferior e relação C/N mais baixa que o carbono normalmente observado em solos naturais (Dick *et al.*, 2002). Deve-se considerar que, em função da natural variabilidade da distribuição radicular no solo, análise com níveis rigorosos de significância como os adotados neste estudo, não são os mais adequados e uniformizam os resultados, como os obtidos na camada 0,10-0,20m da Tabela III. Sugere-se a adoção de outros tratamentos estatísticos para este tipo de estudo.

A presença de carvão é corroborada com a análise da composição química da camada de 0,20-0,30m, principalmente relacionada aos elevados valores de acidez potencial e saturação por alumínio e baixos valores de pH (Tabela VI), evidenciando assim o processo de

sulfurização nesta camada devido à presença de estéreis. Fragmentos de rochas (material estéril) que contém enxofre reduzido, como o carvão, quando expostos ao ar e à água resultam na produção de grandes quantidades de ácido sulfúrico, que em contato com a água de drenagem e oxigênio gera a água ácida de mina, com valores de pH muito baixos (Brady e Weil, 2013). O processo de sulfurização após 24 anos de construção do solo em diferentes áreas de mineração no Rio Grande do Sul, Brasil, com implicações negativas no desenvolvimento da vegetação e na recuperação da área degradada também foi observado por Inda *et al.* (2010).

Contudo, os resultados observados na Tabela VI também evidenciam os efeitos positivos da incorporação de calcário até a profundidade ~0,15m, ocorrida antes da implantação das espécies vegetais. Os valores de pH mostram-se acima ou próximos do valor de referência para gramíneas perenes de verão (pH>5,5) nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m, enquanto que os teores de Ca e Mg variaram de altos (>4,0cmolc·kg⁻¹) a médios (2,1-4,0cmolc·kg⁻¹), a saturação de bases (V) variou de alta (>80%) a média (65-80%) e a saturação por alu-

TABELA VI
VALORES MÉDIOS DE pH EM ÁGUA, DO TEOR DE CÁLCIO, MAGNÉSIO, DA ACIDEZ POTENCIAL (H+Al), DA CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS POTENCIAL (CTC_{pH7,0}), DA SATURAÇÃO POR BASES (V) E POR ALUMÍNIO (m) DE UM SOLO CONSTRUÍDO CULTIVADO COM DIFERENTES GRAMÍNEAS NAS CAMADAS DE 0-0,10m, 0,10-0,20m E 0,20-0,30m AOS 103 MESES DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Tratamentos	pH em água	Ca	Mg	H+Al	CTC _{pH7,0}	V	m
		--- cmol _c ·kg ⁻¹ ---			--- % ---		
Camada de 0-0,10m							
<i>H. altissima</i>	6,2 ±0,40 ns	5,8 ±0,75 ns	3,3 ±0,42 ns	1,2 ±0,52 ns	10,7 ±0,93 ns	88,9 ±5,10 ns	0,6 ±0,17 ns
<i>P. notatum</i>	5,7 ±0,18 ns	6,0 ±0,72 ns	3,2 ±0,53 ns	1,7 ±0,34 ns	11,3 ±0,84 ns	84,5 ±2,89 ns	1,2 ±1,12 ns
<i>C. dactylon</i>	5,7 ±0,33 ns	5,1 ±1,61 ns	3,2 ±0,75 ns	2,0 ±0,69 ns	10,6 ±1,82 ns	80,2 ±8,48 ns	0,7 ±0,41 ns
<i>U. brizantha</i>	6,1 ±0,47 ns	6,1 ±1,32 ns	3,6 ±0,68 ns	1,4 ±0,92 ns	11,6 ±1,48 ns	87,5 ±8,08 ns	1,1 ±0,66 ns
Camada de 0,10-0,20m							
<i>H. altissima</i>	5,3 ±0,59 ns	4,0 ±0,62 ns	2,8 ±0,55 ns	3,4 ±1,16 ns	10,3 ±1,31 ns	67,3 ±8,34 ns	11,2 ±10,01 ns
<i>P. notatum</i>	4,8 ±0,77 ns	4,0 ±0,49 ns	2,4 ±0,48 ns	5,2 ±3,59 ns	11,8 ±3,20 ns	59,8 ±16,68 ns	24,7 ±18,76 ns
<i>C. dactylon</i>	5,0 ±0,52 ns	4,1 ±1,79 ns	2,4 ±0,29 ns	4,2 ±1,77 ns	11,0 ±3,32 ns	63,0 ±5,59 ns	15,6 ±13,49 ns
<i>U. brizantha</i>	5,5 ±1,08 ns	4,5 ±1,19 ns	3,1 ±0,39 ns	3,4 ±2,86 ns	11,4 ±1,81 ns	72,4 ±18,83 ns	12,4 ±11,89 ns
Camada de 0,20-0,30m							
<i>H. altissima</i>	4,4 ±0,82 ns	3,0 ±0,97 ns	2,1 ±0,52 ns	7,9 ±3,62 ns	13,3 ±4,65 ns	42,5 ±11,88 a	35,4 ±15,51 ns
<i>P. notatum</i>	3,9 ±0,77 ns	2,4 ±0,49 ns	1,7 ±0,39 ns	8,8 ±4,32 ns	13,1 ±4,12 ns	35,3 ±14,19 a	52,6 ±20,76 ns
<i>C. dactylon</i>	4,4 ±1,02 ns	2,8 ±0,25 ns	2,1 ±0,32 ns	7,3 ±6,27 ns	12,4 ±6,09 ns	48,2 ±16,86 a	34,5 ±21,81 ns
<i>U. brizantha</i>	4,3 ±1,12 ns	2,7 ±0,98 ns	1,7 ±0,54 ns	8,0 ±5,24 ns	12,5 ±4,30 ns	41,3 ±20,01 a	39,6 ±31,21 ns

mínio (m) variou muito baixa (<1%) a baixa (1-10%), de acordo com CQFS (2004).

Na camada de 0,10-0,20m o maior teor de CO proporcionado pela *U. brizantha* deve-se possivelmente ao maior volume radicular que esta espécie apresenta (Tabela III) mesmo em condições de Ds e RP elevados (Tabela IV). Espécies de plantas com sistemas radiculares profundos e abundantes e uma elevada produção de biomassa podem produzir maiores quantidades de carbono orgânico, e conseqüentemente recuperar as propriedades físicas do solo (Ralisch *et al.*, 2010; Baquero *et al.*, 2012).

O estabelecimento de vegetação e a gradual adição de resíduos durante o período de recuperação de solos minerados têm sido reportados como a razão para as melhorias no conteúdo de carbono orgânico ao longo do tempo (Maharana e Patel, 2013). Li *et al.* (2015) observaram que solos construídos há 18 anos apresentavam um teor de carbono orgânico de 11,55 a 33,00g.kg⁻¹, enquanto que um solo construído há 1 ano apresentava 6,00g.kg⁻¹. Zhao *et al.* (2013) também observaram que um solo construído com 13 anos de idade apresentou teor de carbono orgânico cerca de 2,0 e 3,1 vezes mais elevado do que solos construídos há 3 e 4 anos, respectivamente. Por sua vez, Akala e Lal (2001) também observaram que o conteúdo de carbono orgânico aumentou de 9,2Mg.ha⁻¹ em solos construídos

há 5 anos para 55,4Mg.ha⁻¹ após 15 anos de recuperação.

O efeito positivo do desenvolvimento do sistema radicular das espécies vegetais ao longo do tempo é evidenciado através da correlação positiva das variáveis de raiz (DR, VR, CR e AR) com o teor de CO (Tabela VII). Ressalta-se que devido à presença de estêreis, que podem mascarar os resultados de CO do solo, e a quase ausência de raízes na camada de 0,20-0,30m, as correlações foram realizadas com os resultados obtidos na profundidade de 0,20 m, onde a presença da camada de solo foi predominante (Tabela II).

Apesar dos resultados de Ds, PT, Ma e RP evidenciam a presença de uma camada compactada abaixo dos 0,10m, mesmo após 103 meses de condução do experimento (Tabela IV), é possível observar o efeito positivo das raízes na recuperação dos atributos físicos do solo através da correlação positiva entre as variáveis de raiz (DR, VR, CR e AR) e a PT e Ma na profundidade de 0,20m (Tabela VII). Destes parâmetros, a DR é a que apresenta as melhores correlações com os outros atributos, exceção ao Mi, sendo um bom indicador da capacidade de recuperação estrutural do solo pelas raízes.

De forma geral, é possível dizer que o período de 103 meses foi o suficiente para que as diferentes gramíneas se desenvolvessem na camada de 0-0,10m e proporcionassem

melhorias na estrutura do solo nesta camada. Possivelmente, o mesmo período seja suficiente para que a qualidade estrutural das demais camadas seja recuperada através do desenvolvimento radicular das plantas em profundidade.

Conclusões

O desenvolvimento, em profundidade, das raízes das gramíneas estudadas é afetado pela alta densidade do solo e resistência mecânica à penetração, baixa porosidade total e macroporosidade, baixa concentração de bases trocáveis e pH ácido, advindos do processo de construção do solo pelo uso de máquinas pesadas e a presença de estêreis contaminados por pirita.

A menor densidade e resistência do solo à penetração e a maior macroporosidade apresentadas na camada de 0-0,10m em relação às camadas subjacentes foram proporcionadas pela maior presença de raízes das gramíneas nesta camada do solo construído.

Entre as quatro espécies estudadas, a *Urochloa brizantha* se destaca pela sua maior densidade, volume, área e comprimento radicular, principalmente na camada abaixo de 0-0,10m, apresentando assim um maior potencial em recuperar os atributos físicos de áreas degradadas, principalmente em profundidade.

REFERÊNCIAS

Akala VA, Lal R (2001) Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed mine-soils in Ohio. *J. Environ. Qual.* 30: 2098-2104.

Amaral CS, Barros Silva E, Amaral WG, Nardis BO (2012) Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito. *Biosci. J.* 28: 130-141.

Anghinoni I, Meurer EJ (1999) Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. *Anais do Workshop sobre Sistema Radicular: Metodologias e Estudo de Casos*. Aracaju, Brasil. pp. 57-87.

Baquero JE, Ralisch R, Medina CC, Tavares Filho J, Guimarães MF (2012) Soil physical properties

and sugarcane root growth in a red Oxisol. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36: 63-70.

Bitencourt DGB (2014) *Dinâmica de Acidificação e Metais no Solo e Subsolo de Solos Construídos na Área de Mineração de Carvão de Candiota-RS*. Tese. Universidade Federal de Pelotas. Brasil. 125 pp.

Böhm W (1979) *Methods of Studying Root Systems*. 1^ª ed. Springer. Nova York, EEUU. 188 pp.

Bonfim-Silva EM, Valadão Junior DD, Reis RHP, Campos JJ, Scaramuzza WLMP (2012) Establishment of karaés and marandu grasses under levels of soil compaction. *Eng. Agríc.* 32: 727-735.

Borůvka L, Kozák J, Mühlhanslová M, Donátová H, Nikodem A, Nemeček K (2012) Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *J. Geochem. Explorat.* 113 118-123.

Brady NC, Weil R (2013) *Elementos a Natureza e Propriedades dos Solos*. 3^ª ed. Editora Bookman, Porto Alegre, Brasil. 686 pp.

Chioderoli CA, Mello LD, Grigolli P J, Furlani CE, Silva JO, Cesarin AL (2012) Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 16: 37-43.

CQFS (2004) *Manual de Adubação Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10^ª ed. Comissão de Química e Fertilidade Do Solo. Porto Alegre, Brasil. 404 pp.

Crispim SMA, Júnior WB, Branco OD (2005) *Perfilhamento. Produção de Matéria Seca de Brachiaria brizantha no Pantanal. Sub-Região da Nhecolândia, MS*. Circular Técnica 61. Embrapa. Brasil. 4 pp.

Debiasi H, Levien R, Trein CR, Conte O, Mazurana M (2008) Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32: 2629-2637.

Dick DP, Mangrich AS, Meneses SMC, Pereira BF (2002) Chemical and spectroscopical characterization of humic acids from two south Brazilian coals of different ranks. *J. Braz. Chem. Soc.* 13: 177-182.

Embrapa (2011) *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2^ª ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Brasil. 212 pp.

Embrapa (2006) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2^ª

TABELA VII
COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE VARIÁVEIS DE RAIZ (DR, VR, CR, AR E DMR) E OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO CONSTRUÍDO (DS, PT, Ma, Mi E RP) NA PROFUNDIDADE DE 0,20m

	Ds	PT	Ma	Mi	RP	CO
DR	-0,57**	0,62**	0,48**	-0,13	-0,50**	0,57**
VR	-0,60**	0,64**	0,56**	-0,04	-0,43*	0,56**
CR	-0,63**	0,66**	0,60**	-0,11	-0,45*	0,57**
AR	-0,62**	0,65**	0,59**	-0,08	-0,44*	0,57**
DMR	-0,02	-0,06	0,03	-0,22	-0,06	0,09

DR: densidade radicular, VR: volume radicular, CR: comprimento radicular, AR: área radicular, DMR: diâmetro médio radicular, Ds: densidade do solo, PT: porosidade total, Ma: macroporosidade, Mi: microporosidade, RP: resistência do solo à penetração, CO: carbono orgânico.

*Significativo a 5% de probabilidade de erro, ** significativo a 1% de probabilidade de erro.

- ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Brasil. 306 pp.
- Fidalski J, Barbosa GMDC, Auler PAM, Pavan MA, Beraldo JMG (2009) Qualidade física do solo sob sistemas de preparo e cobertura morta em pomar de laranja. *Pesq. Agropec. Bras.* 44: 76-83.
- Guenni O, Marin D, Baruch Z (2002) Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant Soil* 243: 229-241.
- Girardelo VC, Amado TJC, Nicoloso RS, Hörbe TAN, Ferreira AO, Tabaldi FM, Lanzanova ME (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. Ciênc. Solo* 35: 2115-2126.
- Girardelo VC, Amado TJC, Santi AL, Cherubin MR, Kunz J, Gregori Teixeira T (2014) Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38: 1234-1244.
- Inda AV, Quinões ORG, Giassoni E, Bissani CA, Dick DP, Nascimento PC (2010) Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. *Ciência Rural* 40: 1060-1067.
- Izquierdo I, Caravaca F, Alguacil MM, Hernandez G, Roldan A (2005) Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Appl. Soil Ecol.* 30: 3-10.
- Kämpf N, Schneider P, Giasson E (1997) Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do Baixo Jacuí (RS). *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 21: 79-88.
- Krümmlbein J, Raab T (2012) Development of soil physical parameters in agricultural reclamation after brown coal mining within the first four years. *Soil Till. Res.* 125: 109-115.
- Jackson RB, Canadel J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.
- Li J, Zhou X, Yan J, Li H, He J (2015) Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. *Appl. Soil Ecol.* 87: 56-62.
- Lima LB, Petter FA, Leandro WM (2015) Desempenho de plantas de cobertura sob níveis de compactação em Latossolo Vermelho de Cerrado. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 19: 1064-1071.
- Lima RP, León MJ, Silva AR (2013) Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Ceres* 60: 16-20.
- Lima VMP, Oliveira GC, Serafim NE, Curi N, Evangelista AR (2012) Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36: 71-78.
- Maharana JK, Patel AK (2013) Characterization of physico-chemical properties and their impact on enzyme activities in a chronosequence coal mine overburden spoil as biomarker for reclamation process. *J. Bacteriol. Parasitol.* 4: 174-183.
- Mukhopadhyay S, Maiti SK, Mastro RE (2014) Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecol. Eng.* 71: 10-20.
- Neto AL, Albuquerque JA, De Almeida JA, Mafra AL, Medeiros JC, Alberton A (2008) Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32: 1379-1388.
- Nunes MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS (2015) Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. *Geoderma* 260: 149-155.
- Otto R, Silva AP, Franco HCJ, Oliveira ECA, Trivelin PCO (2011) High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil Till. Res.* 117: 201-210.
- Pedrotti A, Pauletto EA, Gomes A da S, Turatti AL, Crestana S (2001) Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. *Pesq. Agropec. Bras.* 36: 709-715.
- Peek MS, Leffler AJ, Ivans CY, Ryel RJ, Caldwell MM (2005) Fine root distribution and persistence under field conditions of three co-occurring Great Basin species of different life form. *New Phytol.* 165: 171-180.
- Ralisch R, Almeida E, Silva AP, Pereira Neto OC, Guimarães MF (2002) Morphostructural characterization of soil conventionally tilled with mechanized and animal traction with and without cover crop. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34: 1795-1802.
- Reichert JM, Reinert JD, Braid JA (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. *Ciênc. Amb* 27: 29-48.
- Reichert JM, Kaiser DR, Reinert DJ, Riquelme UFB (2009a) Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.* 44: 310-319.
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert DJ, Horn R, Håkansson I (2009b) Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* 102: 242-254.
- Reinert DJ, Albuquerque JA, Reichert JM, Aita C, Andrada MMC (2008) Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32: 1805-1816.
- Sena K, Barton C, Hall S, Angel P, Agouridis C, Warner R (2015) Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States. *Restor. Ecol.* 23: 131-138.
- Sheoran V, Sheoran AS, Poonia P (2010) Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *Int. J. Soil Sedim. Water* 3: 2-13.
- Sigmaplot (2004) *Sigmaplot for Windows*, version 9.01. Systat Software, Inc. San José, CA, EEUU.
- Silva FR, Albuquerque JÁ, Costa A (2014) Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38: 1731-1739.
- Silva GP, Fontes MPF, Costa LM, Venegas VHA (2006) Potencialidade de plantas para revegetação de estereis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-MG. *Pesq. Agropec. Trop.* 36: 165-172.
- Silva MT (2013) *Potencial de Acidificação e Contaminação por Metais em Solos Construídos na Área de Mineração de Carvão em Candiota-RS*. Tese. Universidade Federal de Pelotas, Brasil. 58 p.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31.
- Sourkova M, Frouz J, Fettweis U, Bens OH, Santruckova H (2005) Soil development and properties of microbial biomass succession in reclaimed post mining sites near Sokolov (Czech Republic) and near Cottbus (Germany). *Geoderma* 129: 73-80.
- Stolf R (1991) Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrometro de impacto em resistência do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 15: 229-235.
- Stumpf L, Pauletto EA, Fernandes FF, Suzuki LEAS, Silva TS, Pinto LFS, Lima CLR. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38: 327-335.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ (1995) *Análise de Solo, Plantas e Outros Materiais*. 2ª ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 174 pp.
- Wick AF, Ingram LJ, Stahl PD (2009) Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes. *Soil Biol. Biochem.* 41: 201-209.
- Zhao Z, Shahrour I, Bai Z, Fan W, Feng L, Li H (2013) Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *Eur. J. Soil Biol.* 55: 40-46.
- Zhang L, Jinmanwang W, Bai Z, Chunjuan LV (2015) Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena* 128: 44-53.