

Características químicas de um solo construído e seus efeitos no desenvolvimento radicular de gramíneas perenes

Lizete Stumpf¹, Eloy Antonio Pauletto², Luiz Fernando Spinelli Pinto², Jordano Vaz Ambus², Gabriel Furtado Garcia², Tiago Stumpf da Silva²

¹ Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rua Marechal Floriano Peixoto, 2236, Centro, CEP 96170-000, São Lourenço do Sul-RS, Brasil. E-mail: zete.stumpf@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Solos, Campus Universitário, Centro, CEP 96001-970, Pelotas-RS, Brasil. Caixa Postal 354. E-mail: pauletto_sul@yahoo.com.br; lfspin@uol.com.br; jv.ambus@gmail.com; gabrielgarciag2@hotmail.com; tiago.stumpf@hotmail.com

RESUMO

O trabalho tem como objetivo caracterizar a condição química de um solo construído após a mineração de carvão e avaliar sua influência no desenvolvimento radicular de gramíneas perenes. O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão localizada em Candiota/RS. O solo foi construído em janeiro/fevereiro de 2003 e o experimento instalado em novembro/dezembro de 2003. As espécies vegetais avaliadas foram a *Hemarthria altissima*, o *Paspalum notatum* cv. Pensacola, o *Cynodon dactylon* cv Tifton e a *Urochloa brizantha*. A amostragem de solo e raízes foi realizada em julho de 2012, foram coletadas 48 amostras de solo para a determinação de atributos químicos do solo construído e 16 monólitos de solo para determinação dos atributos radiculares das espécies vegetais. O uso de espécies vegetais na recuperação de solos construídos após mineração de carvão deve considerar a espessura da camada de solo reposta sobre os estéreis, pois quando as raízes entram em contato com pH extremamente baixo e acidez potencial elevada, podem ter seu desenvolvimento reduzido. As gramíneas perenes diminuíram seu desenvolvimento radicular principalmente na camada de 0,20-0,30 m, possivelmente devido ao processo de sulfurização, originada pela presença de pirita.

Palavras-chave: *Cynodon dactylon*, *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum*, *Urochloa brizantha*

Chemical characteristics of a constructed soil and their effects on root development of perennial grasses

ABSTRACT

This study aims to characterize the chemical condition of the constructed soil after coal mining and to evaluate its influence on root development of perennial grasses. The study was conducted in a coal mining area located in Candiota/RS. The soil was constructed in January/February 2003 and the experiment carried out in November/December 2003. Plant species evaluated were *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum* cv. Pensacola, *Cynodon dactylon* cv Tifton and *Urochloa brizantha*. The soil and root sampling was made in July 2012, 48 soil samples to determine constructed soil chemical attributes and 16 soil monoliths to determine the root attributes of plant species were collected. The use of plant species in recovery of constructed soils after coal mining should consider the depth of the soil layer replaced on the mine spoils. Plant species decreased root development mainly in the layer of 0.20-0.30 m characterized by extremely low pH and high potential acidity, possibly due to the sulfurization process, caused by the presence of pyrite.

Key words: *Cynodon dactylon*, *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum*, *Urochloa brizantha*

Introdução

A mineração de carvão a céu aberto provoca impacto negativo na paisagem, eliminando a vegetação e alterando permanentemente a topografia, a geologia e o regime hidrológico da área, mediante a movimentação e remoção de grandes volumes de solo e de rochas (Zhao et al., 2013; Zhang et al., 2015). Durante a recomposição topográfica das áreas mineradas, muitas vezes, a camada de solo é substituída por fragmentos do extrato rochoso ou estéreis (Daniels & Zipper, 2010); todavia, estes levam tempo para evoluir para solo, reduzindo assim a sua capacidade em tornarem-se novamente produtivos (Onweremadu, 2007). No norte da China, Zhao et al. (2013) avaliaram o desenvolvimento de solos a partir de estéreis da mineração de carvão a céu aberto e observaram que o teor de matéria orgânica aumentou ao longo de 13 anos, bem como o desenvolvimento do sistema radicular das plantas atuou de forma mais significativa na melhoria da agregação do solo entre 5 e 10 anos após a revegetação da área.

O processo de recuperação dos solos construídos pode ser acelerado pela adição de uma camada de solo sobre os estéreis (Mukhopadhyay et al., 2014), principalmente por evitar a drenagem ácida de mina, que ocorre quando minerais sulfetados, como a pirita, estão presentes nos fragmentos de rochas usados na recomposição topográfica da área minerada (Pinto & Kampf, 2002). A pirita em contato com oxigênio e água gera o ácido sulfúrico (Finkelman & Gross, 1999), que reduz drasticamente o pH (Daniels & Zipper, 2010), além de gerar grandes concentrações de Fe, Mn e Al na solução (Chen et al., 2013; Limpitlaw et al., 1997), com implicações negativas na revegetação da área degradada (Inda et al. 2010). Nunes (2002) observou que os métodos de construção que utilizam pouca espessura de solo originam solos construídos com grande quantidade de estéreis de mineração e, conseqüentemente, com baixos valores de pH (em torno de 2,4).

Os atributos químicos de solos minerados devem ser conhecidos para garantir pleno desenvolvimento das plantas precursoras da recuperação de áreas degradadas, e visando auxiliar no retorno do novo solo recomposto, a uma forma de utilização, não necessariamente agrícola, de acordo com um plano pré-estabelecido pela mineradora (Sánchez, 2010). Portanto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a condição química de um solo construído após a mineração de carvão em Candiota/RS e avaliar sua influência no desenvolvimento radicular de gramíneas perenes.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão, sob concessão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada em Candiota/RS com as seguintes coordenadas geográficas: 31° 33' 56" S e 53° 43' 30" W.

As principais etapas envolvidas no processo de extração do carvão a céu aberto e a posterior recomposição topográfica da área minerada abrangem a remoção dos horizontes A, B e/ou C do solo original e das rochas (Figura 1A), seguido da

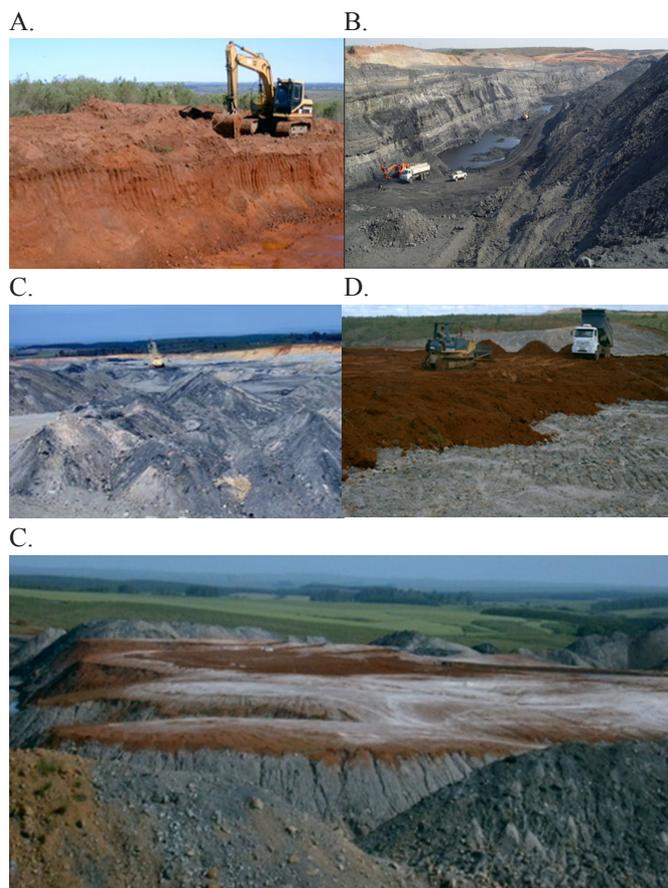


Figura 1. Remoção dos horizontes do solo (A); Extração do carvão (B); Deposição dos estéreis (C); Reposição da camada de solo (D); Solo construído após recomposição topográfica (E)

extração dos bancos de carvão (Figura 1B). Na cava aberta para a extração do minério, depositam-se os estéreis (mistura de rochas e carvão não aproveitados), que são aplainados por tratores de esteira durante a recomposição topográfica da área (Figura 1C) e que recebem, posteriormente, uma camada de solo (horizonte A e/ou B) (Figura 1D) retirada anteriormente à lavra do carvão, originando assim o “solo construído” (Figura 1E).

O solo da área em estudo foi construído em janeiro/fevereiro de 2003 e sobre os rejeitos foi reposto uma camada superficial de solo com predomínio do horizonte B de um Argissolo Vermelho eutrófico típico, de classe textural argilosa, conforme mostrado na Tabela 1.

Antes da instalação do experimento, devido a área se encontrar extremamente compactada devido a grande circulação de máquinas durante a construção do solo (caminhões carregados com aproximadamente 20 Mg de terra vegetal e tratores de esteira metálica do modelo D8T da Caterpillar® com peso de 38 Mg, potência de 259 kW, comprimento e largura da esteira sobre o solo de 3,20 e 0,56 m, respectivamente, e área de contato das esteiras com o solo de 3,6 m²), o solo construído foi escarificado com patola a uma profundidade aproximada de 0,15 m, seguido por calagem correspondente a 10,4 Mg ha⁻¹ de calcário com PRNT de 100 % e adubação com 900 kg ha⁻¹ de NPK na fórmula 5-20-20, com base em resultados obtidos pela análise de solo.

Tabela 1. Granulometria nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30m do solo construído

Camada (m)	Areia	Silte (g kg ⁻¹)	Argila	Classe textural
0,00-0,10	336	211	453	Argilosa
0,10-0,20	318	204	478	Argilosa
0,20-0,30	259	274	467	Argilosa

O experimento com as espécies vegetais foi instalado em novembro/dezembro de 2003, em parcelas de 20 m², em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. As espécies vegetais avaliadas foram a *Hemarthria altissima*, o *Paspalum notatum* cv. Pensacola, o *Cynodon dactylon* cv Tifton e a *Urochloa brizantha*.

Em julho de 2012 foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m para a determinação do pH em água, dos teores de cálcio, de magnésio, de sódio e potássio, da acidez potencial, da saturação por bases e alumínio e do teor de carbono orgânico total, perfazendo um total de 48 amostras (4 blocos x 4 tratamentos x 1 repetição por parcela x 3 camadas).

As amostras de solo foram mantidos à sombra e secos ao ar, destorroadas com rolo de madeira e passada em peneira com abertura de malha de 2 mm. O pH foi determinado em água na relação 1:1 (solo:água); cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados no espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg) e por titulação com NaOH (Al). Os teores de potássio (K) e sódio (Na) disponíveis foram estimados pelo método Mehlich¹ e analisado por fotometria de chama; A acidez potencial foi extraída com acetato de cálcio e determinada por titulação com NaOH. Com base nos resultados das análises foi calculada a capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), conforme Embrapa (2011). O carbono orgânico (CO) foi determinado pelo método de combustão Walkley-Black, segundo Tedesco et al. (1995).

Na mesma data foram também coletadas amostras de raízes, através do método do monólito (Bhöm, 1979), com o auxílio de placas com pregos (0,40 m de comprimento x 0,30 m de altura x 0,035 m de largura), totalizando 16 placas de pregos (4 repetições por tratamento).

Após a coleta dos monólitos, estes foram embalados com filme plástico e encaminhados ao laboratório, para procedimento de lavagem e separação das raízes. A lavagem consistiu em saturar a placa por 24 h em solução de NaOH 0,2 mol L⁻¹ para dispersar o solo e facilitar a lavagem das raízes; 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 (0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m), cortadas e lavadas em uma peneira com abertura de 1 mm, armazenadas em sacos plásticos e refrigeradas a uma temperatura de 2°C. Posteriormente, as raízes foram digitalizadas em scanner HP Scanjet 3570C para determinação de volume, de comprimento

e de diâmetro radicular, através do Software SAFIRA. Após o escaneamento, as raízes foram secas em estufa a 65°C por um período de 72 h, 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 de cada camada avaliada. Em todos os monólitos coletados, fez-se a medição da espessura da camada de solo (Tabela 2).

Os dados 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).

Tabela 2. Espessura da camada de solo e estéril nos diferentes blocos e tratamentos do solo construído em Candiota, até a profundidade de 0,30 m

Camada	Bloco	Tratamentos (m)			
		H. <i>altissima</i>	P. <i>notatum</i>	C. <i>dactylon</i>	U. <i>brizantha</i>
Solo	I	0,30	0,18	0,30	0,17
Estéril		Ausente	0,12	Ausente	0,13
Solo	II	0,30	0,30	0,30	0,30
Estéril		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Solo	III	0,20	0,30	0,25	0,30
Estéril		0,10	Ausente	0,05	Ausente
Solo	IV	0,20	0,30	0,20	0,20
Estéril		0,10	Ausente	0,10	0,10

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que, independentemente das espécies utilizadas, a maioria dos atributos químicos não apresentaram diferenças significativas entre si. No entanto, os resultados observados evidenciam os efeitos positivos da incorporação de calcário até a profundidade aproximada de 0,15 m, ocorrida antes da implantação das espécies vegetais. De acordo com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS, 2004) os valores de pH observados na camada de 0,00-0,10 m mostram-se acima do valor de referência para gramíneas perenes de verão (pH>5,5), enquanto que na camada abaixo de 0,10 m os valores estão próximos (camada de 0,10-0,20m) ou abaixo (camada de 0,20-0,30 m) do valor de referência.

Os valores mais baixos de pH na camada de 0,20-0,30 m, devem-se possivelmente à presença de estereis em algumas repetições dos monólitos, conforme se visualiza na Tabela 2. 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 & Weil, 2013) por essa razão, o pH do solo é um dos mais comuns indicadores químicos utilizados na avaliação da qualidade de solos construídos (Sheoran et al., 2010). Inda et al. (2010) observaram o processo de sulfurização após 24 anos de construção do solo em diferentes áreas de mineração no Rio Grande do Sul, com implicações negativas no desenvolvimento da vegetação e na recuperação da área degradada.

Esta consequência química negativa da mineração de carvão pode ser corrigida através do uso de elevadas

Tabela 3. Valores médios de pH em água, do teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na), 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 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m aos 103 meses de condução do experimento

Trat.	pH em água	Ca (cmolc kg ⁻¹)	Mg (cmolc kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Na (mg kg ⁻¹)	H+Al (cmolc kg ⁻¹)	CTC _{pH7,0} (cmolc kg ⁻¹)	V (%)	m (%)
Camada de 0,00-0,10 m									
<i>H. altissima</i>	6,25±0,40 ns	5,78±0,75 ns	3,34±0,42 ns	123,75±44,65 ns	13,59±2,72 ns	1,17±0,52 ns	10,66±0,93 ns	88,87±5,10 ns	0,60±0,17 ns
<i>P. notatum</i>	5,75±0,18 ns	6,04±0,72 ns	3,18±0,53 ns	118,81±15,38 ns	14,55±6,73 ns	1,75±0,34 ns	11,33±0,84 ns	84,53±2,89 ns	1,22±1,12 ns
<i>C. dactylon</i>	5,74±0,33 ns	5,07±1,61 ns	3,16±0,75 ns	148,15±48,46 ns	11,96±2,46 ns	1,99±0,69 ns	10,65±1,82 ns	80,24±8,48 ns	0,75±0,41 ns
<i>U. brizantha</i>	6,14±0,47 ns	6,06±1,32 ns	3,64±0,68 ns	169,20±66,74 ns	13,00±3,20 ns	1,40±0,92 ns	11,58±1,48 ns	87,54±8,08 ns	1,12±0,66 ns
Camada de 0,10-0,20 m									
<i>H. altissima</i>	5,34±0,59 ns	4,00±0,62 ns	2,82±0,55 ns	54,80±16,89 b	13,89±3,36 ns	3,42±1,16 ns	10,34±1,31 ns	67,31±8,34 ns	11,20±10,01 ns
<i>P. notatum</i>	4,80±0,77 ns	4,02±0,49 ns	2,44±0,48 ns	53,00±8,82 b	13,48±4,98 ns	5,18±3,59 ns	11,83±3,20 ns	59,78±16,68 ns	24,74±18,76 ns
<i>C. dactylon</i>	5,00±0,52 ns	4,15±1,79 ns	2,42±0,29 ns	82,66±47,57 ab	11,19±1,75 ns	4,16±1,77 ns	10,99±3,32 ns	63,07±5,59 ns	15,59±13,49 ns
<i>U. brizantha</i>	5,52±1,08 ns	4,55±1,19 ns	3,07±0,39 ns	117,98±83,33 a	13,45±4,30 ns	3,38±2,86 ns	11,37±1,81 ns	72,40±18,83 ns	12,40±11,89 ns
Camada de 0,20-0,30 m									
<i>H. altissima</i>	4,37±0,82 ns	3,01±0,97 ns	2,10±0,52 ns	38,16±11,22 b	15,68±3,84 ns	7,92±3,62 ns	13,30±4,65 ns	42,52±11,88 a	35,45±15,51 ns
<i>P. notatum</i>	3,91±0,77 ns	2,40±0,49 ns	1,70±0,39 ns	30,28±4,98 b	15,49±5,85 ns	8,85±4,32 ns	13,09±4,12 ns	35,28±14,19 a	52,64±20,76 ns
<i>C. dactylon</i>	4,43±1,02 ns	2,78±0,25 ns	2,14±0,32 ns	36,74±13,53 b	15,25±5,36 ns	7,29±6,27 ns	12,38±6,09 ns	48,21±16,86 a	34,46±21,81 ns
<i>U. brizantha</i>	4,27±1,12 ns	2,67±0,98 ns	1,68±0,54 ns	58,30±13,76 a	14,34±2,92 ns	7,96±5,24 ns	12,51±4,30 ns	41,35±20,01 a	39,64±31,21 ns

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

quantidades de calcário (Silva, 2012). No entanto, Caires et al. (2008) mencionam um período de 8 a 10 anos para que a aplicação superficial de calcário possa diminuir a acidez na subsuperfície do solo.

No caso do solo construído em estudo, apesar do calcário ter sido incorporado até a profundidade aproximada de 0,15 m, o efeito da calagem ao longo do perfil se torna evidente quando se observam os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas diferentes camadas do solo construído (Tabela 3). Segundo o CQFS (2004), os teores de Ca são altos (>4,0 cmolc kg⁻¹) na camada de 0,00-0,10 m; médios (2,1-4,0 cmolc kg⁻¹) a altos na camada de 0,10-0,20 m e médios na camada de 0,20-0,30 m. O Mg é mais móvel no solo que o Ca (Brady & Weil, 2013), por conta disso se observam teores altos desse nutriente (>1,0 cmolc kg⁻¹) em todas as camadas avaliadas (Tabela 3).

Por outro lado, os teores médios de Ca e altos de Mg na camada de 0,20-0,30 m, onde o pH oscilou entre 3,91 e 4,43, podem ser devido à intemperização dos fragmentos das rochas (estéreis) utilizados na construção do solo. Bitencourt (2014) observou a predominância de Ca e Mg nos estéreis utilizadas na recomposição topográfica de áreas mineradas em Candiota-

RS. Por sua vez, Borůvka et al. (2012) observaram maiores teores de Ca e Mg em solos construídos com fragmentos de rochas na República Tcheca e atribuíram isso à intemperização das rochas, assim como Limpitlaw et al. (1997), que também observaram elevados teores de Ca e Mg, mesmo com pH baixo, na maioria dos solos construídos na África do Sul.

A condição química na camada de 0,20-0,30 m do solo construído (baixo pH e elevados teores de Ca e Mg) pode alterar o modo de adaptação do sistema radicular das diferentes espécies em solos construídos. Inclusive, já é possível observar a presença de raízes, apesar da menor proporção, nesta camada do solo construído (Tabela 4).

Em relação aos teores de potássio (K) se verifica que os valores oscilaram entre alto (61-121 mg kg⁻¹) a muito alto (>120 mg kg⁻¹) na camada de 0,00-0,10 m, médio (41-60 mg kg⁻¹) a muito alto na camada de 0,10-0,20 m e baixo (21-40 mg.kg⁻¹) a médio na camada de 0,20-0,30 m (Tabela 3). Os teores elevados de K, principalmente na camada de 0,00-0,10 m, possivelmente devem-se a adubação realizada anualmente na área experimental desde a implantação das espécies vegetais. Todavia, os maiores teores de K apresentados nas camadas

Tabela 4. Valores médios de densidade radicular (DR), volume radicular (VR), comprimento radicular (CR) e diâmetro médio radicular (DMR) de quatro gramíneas e o teor de carbono orgânico (CO) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m de um solo construído após 103 meses de condução do experimento

Trat.	DR (Mg m ⁻³)	VR (m ³ m ⁻³)	CR (mm)	DMR (mm)	CO (g kg ⁻¹)
Camada de 0,00-0,10 m					
<i>H. altissima</i>	7,26±3,54 b	0,023±0,010 ab	51.724±15001 ab	0,32±0,01 ns	8,39±1,43 ns
<i>P. notatum</i>	2,78± 2,12 c	0,008±0,006 b	24497±15721 b	0,32±0,02 ns	7,67±2,16 ns
<i>C. dactylon</i>	4,26±0,89 bc	0,011±0,003 b	27576±9934 b	0,32±0,01 ns	8,37±1,84 ns
<i>U. brizantha</i>	13,29±0,85 a	0,032±0,009 a	72093±21694 a	0,31±0,01 ns	10,37±2,53 ns
Camada de 0,10-0,20 m					
<i>H. altissima</i>	2,71±1,63 b	0,010±0,004 ab	25226±4156 ab	0,32±0,02 ns	5,90±0,24 b
<i>P. notatum</i>	0,87±0,14 b	0,002±0,000 b	7830±1000 c	0,31±0,01 ns	6,96±3,75 ab
<i>C. dactylon</i>	2,01±1,18 b	0,008±0,003 b	17598±6557 bc	0,32±0,01 ns	4,81±0,72 b
<i>U. brizantha</i>	6,00±1,67 a	0,017±0,007 a	37876±15086 a	0,32±0,03 ns	8,35±1,54 a
Camada de 0,20-0,30 m					
<i>H. altissima</i>	0,74±0,20 ns	0,004±0,001 ns	11038±6355 ns	0,33±0,05 ns	10,83±5,92 ns
<i>P. notatum</i>	0,81±0,66 ns	0,002±0,002 ns	7840±4611 ns	0,31±0,02 ns	8,16±4,84 ns
<i>C. dactylon</i>	0,60±0,33 ns	0,002±0,001 ns	8024±4605 ns	0,32±0,03 ns	6,80±5,27 ns
<i>U. brizantha</i>	1,24±0,72 ns	0,003±0,002 ns	9940±5588 ns	0,35±0,06 ns	9,48±3,65 ns

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

abaixo de 0,10 m, sob cultivo de *U. brizantha*, podem indicar a maior biociclagem promovida pelo seu sistema radicular, pois entre as espécies estudadas foi a que apresentou a maior densidade, volume, comprimento e área radicular (Tabela 4), indicando sua maior rusticidade em se desenvolver em áreas degradadas. Amaral et al. (2012) também observaram que o sistema radicular da *U. brizantha*, sob adubação orgânica e mineral em estéril da mineração de quartzito, acumulou nutrientes na seguinte ordem: N > S > K > Ca > Mg > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn. Para os autores, esta é uma espécie alternativa para aumentar a sustentabilidade dos sistemas degradados, visto que os nutrientes acumulados podem ser liberados ao solo pela decomposição dos resíduos radiculares.

Ao analisar a acidez potencial (H+Al), observa-se que os maiores valores ocorreram na camada de 0,20-0,30 m (7,29 a 8,85 cmolc kg⁻¹) (Tabela 3), evidenciando o processo de sulfurização nesta camada do solo construído, devido à presença de estéreis. Conseqüentemente, nesta camada do solo construído o maior valor da CTC_{PH7,0} deve-se possivelmente a maior liberação de alumínio ao meio. Bittencourt (2014) também observou em perfis de solos construídos na mina de Candiota, que a CTC dos materiais do estéril era 2 a 3 vezes mais elevada do que a CTC das camadas de solo.

De maneira geral foi observada uma alta saturação por bases (>80 %) na camada de 0,00-0,10 m, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m a saturação variou de média (65-80 %) a baixa (45-64 %) e na camada de 0,20-0,30 m variou de baixa (45-64 %) a muito baixa (<45 %) (Tabela 3). O processo de sulfurização se evidencia novamente na camada de 0,20-0,30 m quando se analisa a saturação por alumínio, com valores superiores a 20 % (Tabela 3), considerado alto de acordo com a CQFS (2004).

Em relação às variáveis de raiz se observa que tanto na camada de 0,00-0,10 m como na camada de 0,10-0,20 m, onde as condições químicas são as mais favoráveis ao desenvolvimento radicular das plantas, com destaque para a *U. brizantha* que apresentou a maior densidade radicular em relação às demais gramíneas, bem como apresentou um maior volume radicular (VR) e comprimento radicular (CR) em relação ao *P. notatum* e ao *C. dactylon* (Tabela 4). Guenni et al. (2002) observaram que as espécies do gênero *Urochloa* podem penetrar no solo até 0,90 m, e que a *U. brizantha* é a espécie que apresenta maior biomassa de raízes até a profundidade de 0,30 m.

Quanto ao diâmetro médio radicular (DMR) somente a *U. brizantha* apresentou engrossamento de raízes à medida que foi se aprofundando no solo (Tabela 4). Este resultado pode ser um sintoma desta espécie em relação à elevada saturação por alumínio observada na camada de 0,20-0,30 m (Tabela 3). De acordo com Brady & Weil (2013), o sintoma de toxicidade de alumínio mais comum nas plantas é o sistema radicular atrofiado, com raízes pequenas e grossas e as extremidades quase sempre de cor pardacenta.

As correlações entre as variáveis químicas do solo e as variáveis de raiz (Tabela 5) mostram a necessidade de se manter os solos construídos corrigidos e fertilizados para que o sistema radicular possa se desenvolver sem restrições

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de raiz (DR, VR, CR, AR e DMR) e as variáveis químicas do solo construído (pH, Ca, Mg, H+Al, V, m e CO) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m

	pH	Ca	Mg	H+Al	V	M	CO
Camada de 0,00-0,10 m							
DR	0,40	0,29	0,49	-0,31	0,35	-0,11	0,56*
VR	0,61*	0,40	0,47	-0,56*	0,56*	-0,33	0,61*
CR	0,57*	0,44	0,46	-0,57*	0,57*	-0,31	0,58*
AR	0,59*	0,43	0,47	-0,57*	0,57*	-0,32	0,61*
DMR	0,16	-0,12	-0,24	-0,05	-0,03	-0,33	0,24
Camada de 0,10-0,20 m							
DR	0,35	0,36	0,64**	-0,26	0,42	-0,27	0,33
VR	0,43	0,45	0,61*	-0,36	0,52*	-0,36	0,25
CR	0,51*	0,42	0,57*	-0,43	0,58*	-0,45	0,31
AR	0,47	0,44	0,61*	-0,39	0,55*	-0,40	0,28
DMR	-0,04	0,23	0,56*	0,04	0,06	-0,01	0,06
Camada de 0,20-0,30 m							
DR	0,48	0,18	0,03	-0,50*	0,42	-0,43	-0,18
VR	0,61*	0,01	0,07	-0,61*	0,47	-0,48	-0,31
CR	0,54*	0,03	0,12	-0,58*	0,42	-0,43	-0,24
AR	0,62*	0,03	0,11	-0,64**	0,48	-0,49	-0,31
DMR	-0,49	0,14	-0,12	0,51*	-0,34	0,27	0,31

DR = densidade radicular; VR = volume radicular; CR = comprimento radicular; AR = área radicular; DMR = diâmetro médio radicular; Ca = teor de cálcio; Mg = teor de magnésio; H+Al = acidez potencial; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; CO = teor de carbono orgânico. *Significativo a 5% de probabilidade de erro. **Significativo a 1% de probabilidade de erro.

químicas e assim proporcionar melhorias na estrutura do novo solo. Na camada de 0,00-0,10 m as variáveis de raiz (VR, CR e AR) se correlacionaram positivamente com o pH do solo e com a saturação por bases, bem como se correlacionaram negativamente com a acidez potencial. Na camada de 0,10-0,20 m todas as variáveis de raízes se correlacionaram positivamente com o teor de Mg, evidenciando a influência deste elemento no desenvolvimento radicular das gramíneas avaliadas (Tabela 5). Moreira et al. (2005) observaram que solos degradados que receberam calcário até a profundidade de 0,30 m apresentaram uma distribuição radicular uniforme, concentrando 53,4 % das raízes nesta camada. No caso do solo construído se observa que, de maneira geral, a adição de calcário proporcionou as condições de acidez (pH e m) e nutricional (Ca, Mg e V) adequadas para o desenvolvimento radicular das quatro gramíneas até a profundidade de 0,20 m. Na camada de 0,20-0,30 m, onde há presença de material estéril (Tabela 2) e uma menor proporção de raízes quando comparada às camadas anteriores (Tabela 4), todas as variáveis de raiz se correlacionaram negativamente com a acidez potencial (Tabela 5), indicando que as raízes podem apresentar baixo desenvolvimento ao tentarem se estabelecer em camada com presença de estéril.

A presença do carvão no material estéril utilizado durante a construção do solo é também evidenciada através dos teores de carbono orgânico (CO) na camada de 0,20-0,30 m, onde os valores variaram de 6,80 g kg⁻¹ a 10,83 g kg⁻¹ (Tabela 4). Elevados teores de carbono em estéreis também foram observados por Bittencourt (2014) e Silva (2012), 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).

Na camada de 0,00-0,10 m, os teores de CO similares à camada de 0,20-0,30 m (7,67 g kg⁻¹ a 10,37 g kg⁻¹) devem-

se à maior presença de raízes (Tabela 4) somada à deposição superficial dos resíduos da parte aérea (não determinado no estudo, mas observado à campo) das diferentes gramíneas avaliadas. Este resultado pode ser também evidenciado pela correlação positiva entre as variáveis de raiz (DR, VR, CR e AR) e o teor de CO (Tabela 5). De acordo com Izquierdo et al. (2005), o principal input de matéria orgânica no solo se dá pela decomposição dos resíduos da parte aérea e raízes.

Na camada de 0,10-0,20 m o maior teor de CO proporcionado pela *U. brizantha* deve-se possivelmente ao maior desenvolvimento radicular que esta espécie apresenta (Tabela 4), embora ainda não seja uma quantidade suficiente para evidenciar uma correlação entre as variáveis (Tabela 5). A elevada concentração de raízes em determinada camada de solo tende a produzir maiores quantidades de CO, o qual pode influenciar as características físicas, químicas e biológicas do solo (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 & Patel, 2013). Franco (2006) realizou a primeira avaliação do teor de CO no solo construído, do presente estudo, após cinco meses de revegetação e observou na camada de 0,00-0,10 m um teor médio de 5,34 g kg⁻¹, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m o teor foi de 5,18 g kg⁻¹. Após 103 meses de revegetação se observa um incremento médio de 62% no teor de CO na camada de 0,00-0,10 m e de 25,5 % na camada de 0,10-0,20 m. Este resultado evidencia que a deposição dos resíduos vegetais, somado ao maior desenvolvimento radicular das gramíneas na camada de 0,00-0,10 m, contribuiu para o maior incremento de CO na superfície do solo construído, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m, o incremento ocorreu devido, principalmente, a presença de raízes nesta camada.

Conclusões

O uso de espécies vegetais na recuperação de solos construídos após mineração de carvão deve levar em conta a espessura da camada de solo reposta sobre os estéreis, pois quando as raízes entram em contato com pH extremamente baixos e acidez potencial elevada, podem ter seu desenvolvimento reduzido.

As gramíneas perenes diminuíram seu desenvolvimento radicular principalmente na camada de 0,20-0,30 m, possivelmente devido ao processo de sulfurização, originada pela presença de pirita.

Na profundidade de 0,20 m os atributos químicos do solo construído mostram-se adequados ao desenvolvimento radicular das gramíneas mesmo após 103 meses da implantação das espécies.

Agradecimentos

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM), CNPQ-Rede do Carvão, CAPES e CNPq pelo apoio e financiamento do estudo.

Literatura Citada

- Amaral, C.S.; Barros Silva, E.; Amaral, W.G.; Nardis, B.O. Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito. *Bioscience Journal*, v.28, n.1, p.130-141, 2012. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13250/8357>>. 20 Jan. 2016.
- Baquero, J.E.; Ralisch, R.; Medina, C.C.; Tavares Filho, J.; Guimarães, M.F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a Red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.1, p.63-70, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100007>>.
- Bitencourt, D.G.B. Dinâmica de acidificação e metais no solo e subsolo de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2014. 125p. Tese de Doutorado. <<http://repositorio.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/3050/1/TESE.pdf>>. 15 Jan. 2016.
- Böhm, W. *Methods of Studying Root Systems*. New York: Ecological Studies, 1979. 188 p.
- Borůvka, L.; Kozák, J.; Mühlhanslová, M.; Donátová, H.; Nikodem, A.; Němeček, K. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *Journal of Geochemical Exploration*, v.113, p.118-123, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.11.004>>.
- Brady, N.C.; Weill, R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2013. 685p.
- Caires, E.F.; Garbuio, F.J.; Churka, S.; Barth, G.; Corrêa, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *European Journal of Agronomy*, v.28, n.1, p.57-64, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>>.
- Chen, L.; Tian, Y.; Stehouwer, R.; Kost, D.; Guo, X.; Bigham, J.M.; Beeghly, J.; Dick, W.A. Surface coal mine land reclamation using a dry flue gas desulfurization product: Long-term biological response. *Fuel*, v.105, p.258-265, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.081>>.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFS. *Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.
- Daniels, W.L.; Zipper, C.E. *Creation and Management of Productive Mine Soils: Powell River Project*. Virginia: Virginia State University, 2010, 13p. <<http://pubs.ext.vt.edu/460/460-121/460-121>>. 12 Jan. 2016.
- Dick, D.P.; Mangrich, A.S.; Meneses, S.M.C.; Pereira, B.F. Chemical and spectroscopical characterization of humic acids from two south Brazilian coals of different ranks. *Journal Brazilian Chemical Society*, v.13, n.2, p.177-182, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532002000200008>>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa; Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 230p.

- Finkelman, R.B.; Gross, P.M.K. The types of data needed for assessing the environmental and human health impacts of coal. *International Journal of Coal Geology*, v.40, n.1-2, p.91-101, 1999. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00061-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00061-5)>.
- Franco, A.M.P. Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2006. 124p. Dissertação Mestrado. <<http://repositorio.ufpel.edu.br/handle/123456789/2440>>. 03 Jan. 2016.
- Guenni, O.; Marin, D.; Baruch, Z. Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant & Soil*, v.243, n.2, p.229-241, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1019956719475>>.
- Inda, A.V.; Quinões, O.R.G.; Giassoni, E.; Bissani, C.A.; Dick, D.P.; Nascimento, P.C. Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. *Ciência Rural*, v.40, n.5, p.1060-1067, 2010. <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000500010>>.
- Izquierdo, I.; Caravaca, F.; Alguacil, M.M.; Hernandez, G.; Roldan, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, v.30, n.1, p.3-10, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.004>>.
- Limpitlaw, D.; Aken, M.; Kinoni, J.; Mentis, M.; Nell, J.P.; Tanner, P.D. Rehabilitation and soil characterization. In: *International Conference on Coal Research*, 11., 1997, Calgary. Proceedings... Calgary: Canadian Organizing Committee, 1997. p.297-309. <<http://www.limpitlawconsulting.com/97Limpitlaw%20et%20al%201997%20Rehabilitation%20and%20soil%20characterization.pdf>>. 20 Jan. 2016.
- Maharana, J.K.; Patel, A.K. Characterization of physico-chemical properties and their impact on enzyme activities in a chronosequence coal mine overburden spoil as biomarker for reclamation process. *Bacteriology and Parasitology*, v.4, n.4, p.174-183, 2013. <<http://dx.doi.org/10.4172/2155-9597.1000174>>.
- Moreira, J.A.A.; Oliveira, I.P.; Guimarães, C.M.; Stone, L.F. Atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob pastagem recuperada e degradada. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.35, n.3, p.155-161, 2005. <<https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/2217/2173>>. 10 Jan. 2016.
- Mukhopadhyay, S.; Maiti, S.K.; Masto, R.E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering*, v.71, p.10-20, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.001>>.
- Nunes, M.C.D. Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2002. 131p. Dissertação Mestrado.
- Onweremadu, E.U. Chronosequential pedon development on a mined landscape. *Journal of American Science*, v.3, n.2, p.16-22, 2007. <<http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0302/03-0248-onweremadu-landscape>>. 20 Jan. 2016.
- Pinto, L.F.S.; Kämpf, N. Contaminação dos solos construídos. In: Teixeira, E.C.; Pires, M.J.R. (Orgs.). *Meio ambiente e carvão. Impactos da exploração e utilização*. Porto Alegre: Fundação Estadual de Proteção Ambiental, 2002. p.69-92.
- Sánchez, L.E. Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas. In: Alba, J.M.F. (Ed.). *Recuperação de áreas mineradas*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p.103-121.
- Sheoran, V.; Sheoran, A.S.; Poonia, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, v.3, n.2, p.2-13, 2010. <<http://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss2/13>>. 10 Jan. 2016.
- Silva, M.T. Potencial de acidificação e contaminação por metais em solos construídos na área de mineração de carvão em Candiota-RS. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2012. 58p. Dissertação de Mestrado.
- Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S.J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- Zhang, L.; Jinmanwang, W.; Bai, Z.; Chunjuan, LV. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal -mine dump in a loess area. *Catena*, v.128, p.44-53, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>>.
- Zhao, Z.; Shahrour, I.; Bai, Z.; Fan, W.; Feng, L.; Li, H. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, v.55, p.40-46, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.08.006>>.