

SOLO FABRICADO A PARTIR DE REJEITOS DE CARVÃO

Beatriz FIRPO^{1*}; Jéssica WEILER²; Ivo André Homrich SCHNEIDER³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, bia.firpo7@gmail.com, ²UFRGS, jessica.weiler18@gmail.com; ³UFRGS, ivo.andre@ufrgs.br

RESUMO

Danos ambientais da mineração de carvão ocorrem em longo prazo e não devem ser desconsiderados. Para minimizá-los, práticas de controle ambiental devem ser adotadas durante a própria atividade minerária. Considerando-se as consequências ambientais decorrentes do armazenamento de rejeito, este trabalho pesquisou a possibilidade de utilizá-lo como o principal componente de solos fabricados (Antropossolo) após condicionamento com resíduos de outras indústrias de forma a alcançarem-se ganhos ambientais e econômicos e possível uso na recuperação de áreas da mineração de carvão. Rejeito de carvão recebeu fonte de matéria orgânica (lodo de ETE), alcalinidade (escória de aciaria) e melhorador físico (cinza de casca de arroz). A metodologia de trabalho incluiu a amostragem, preparação e caracterização dos referidos materiais. O rejeito foi dessulfurizado em meio denso, britado, moído abaixo de 2 mm e caracterizado em termos de enxofre total, potencial de acidificação e análise imediata. O lodo de ETE foi seco, destorroado e caracterizado conforme CONAMA 375/2006. A escória foi britada, moída e analisada em termos de potencial de neutralização enquanto a cinza de casca de arroz foi levemente cominuída. A mistura dos materiais considerou o balanço ácido base - ABA entre rejeito e escória, o teor de carbono orgânico do lodo e a massa da cinza casca de arroz. Foram preparados vasos de 2,5 L e plantados sequencialmente com Aveia Preta, Ervilhaca e Milho por um período total de 18 meses. Após, os vasos foram ampliados para 10 L e neles cultivou-se Azevém por mais quatro meses. Os solos foram analisados em termos de fertilidade e metais ambientalmente disponíveis (EPA 3050). O tecido vegetal da Aveia Preta e do Azevém foi avaliado em termos de concentração de nutrientes. Os resultados mostram que o rejeito de carvão pode ser utilizado como componente principal para a produção de solos fabricados (substrato) depois de condicionamento.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Mine soil. Escória. Antropossolo. Technosol.

ABSTRACT

Long term environmental hazards caused by coal mining can't be neglected. In order to minimize them, best management practices must be implemented during mining activities. Considering the environmental consequences caused by coal waste storage in landfills, this study considered the possibility of using it as the main component of an artificial soil substrate (technosol) after being amended with the residues from other industries in order to achieve environmental and economic benefits, and possible use in mining reclamation. Coal waste was mixed with a source of organic matter (sewage sludge from a domestic wastewater treatment plant), alkalinity (steel slag) and physical structure (rice husk ash). Methodology included sampling, preparing and characterizing all four materials used in the study. Coal waste was dessulfurized using dense medium separation, ground and milled to a particle size less than 2mm. It was characterized in terms of total sulfur, acid potential and immediate analysis. Sewage sludge was dried; clods were destroyed, and it was characterized following CONAMA 375/2006. Steel slag was ground, milled and analyzed in terms of its neutralization potential, while rice husk ash was slightly milled. The mixture of all materials took acid base accounting (ABA) between coal waste and steel slag, organic carbon present in sewage sludge, and rice husk ash mass into account. Plant containers (2.5 L) were prepared and planted in sequence with lopsided oat, common vetch, and corn for a total period of 18 months. Then, materials were transferred to 10 L plant containers where rye grass was grown for an additional 4 month period. Soils were analyzed in terms of fertility and environmentally available metals (EPA 3050). Nutrients in lopsided oat and rye grass plant tissue were analyzed. Results show that coal waste can be used as the main material of a technosol after being amended.

Key-Words: Sewage sludge. Mine soil. Steel slag. Antropossolo. Technosol.

1 INTRODUÇÃO

O histórico dos problemas ambientais da mineração de carvão em Santa Catarina mostra que desde o início das atividades minerárias houve contaminação dos recursos hídricos, destruição de vegetação e perda de produtividade de extensas áreas. Assim, enquanto o carvão contribui com a geração de energia, reparar os impactos ambientais decorrentes do processo de extração e beneficiamento têm sido um desafio para o setor (BIAN *et al.*, 2010).

A origem dos impactos está, em grande parte, relacionada à drenagem ácida de mina (DAM) que é gerada a partir da oxidação de minerais sulfetados, dentre os quais predomina a pirita (FeS_2). Tipicamente, a DAM apresenta um baixo pH (entre 2,0 e 3,0), altas concentrações de sulfato, ferro (na forma de Fe^{2+} e/ou Fe^{3+} , dependendo das condições oxidantes ou redutoras do meio) e outros metais (Al, Mn e Zn) solubilizados a partir de minerais presentes no ambiente (Kontopoulos, 1998). Isso impede o apropriado crescimento vegetal, danifica zonas alagadas, contamina águas subterrâneas e prejudica estruturas de metal e concreto (FRIPO *et al.*, 2000). Tal efeito é maior e mais duradouro quanto maior for o teor de pirita exposta aos agentes oxidantes. Assim, é de extrema relevância que ocorra a implantação de cobertura vegetal em áreas de mineração de carvão logo do seu encerramento. Entretanto, ocorrem muitas dificuldades nesse processo, pois neles o controle dos processos físicos e químicos se dá majoritariamente por ácidos fortes relacionados à oxidação da pirita ao contrário do solo natural onde o controle se dá por meio de complexos coloidais (DANIELS, 1996; KENT, 1982).

De forma similar aos solos com teores de enxofre naturalmente altos, solos construídos na mineração de carvão e em presença de pirita sofrerão processo de sulfurização. Neste processo os minerais sulfetados são oxidados, enquanto outros minerais são intemperizados pelo ácido sulfúrico produzido e novas fases minerais são formadas a partir de processos de dissolução (FANNING e FANNING, 1989; DANIELS, 1996). Tal mecanismo é considerado por McCloy e Sencindiver (1991) como o processo de formação de solo mais importante nos solos construídos desenvolvidos a partir de materiais piritosos.

No caso específico do tratamento de solos construídos em áreas mineradas, Juwarkar *et al.*

(2004) explicitam que a recuperação é direcionada no sentido de proporcionar estabilidade ao solo em longo prazo, assegurando controle da erosão eólica ou hídrica, redução de lixiviações de nutrientes, diminuição da quantidade de elementos tóxicos potenciais liberados em corpos d'água superficiais ou subsuperficiais e que haja desenvolvimento de vegetação ou ecossistema em harmonia com o ambiente natural do entorno. Ainda, quando do manejo de solos construídos em áreas expostas e/ou influenciadas por materiais piritosos, é necessária a neutralização das reações de acidificação mediante adição de material alcalino a qual tem sido realizada predominantemente por meio da incorporação de calcário ao solo.

Entendendo-se que a recuperação das áreas impactadas implica na implantação de cobertura vegetal, torna-se fundamental a adição de uma camada de solo funcional capaz de mantê-la de maneira efetiva e permanente. Tal solo convencionou-se chamar de "solo construído". O solo construído na mineração do carvão é, na maioria das vezes, composto pela mistura de material argiloso a alguma fonte de matéria orgânica (cama de aviário, por exemplo), ao qual se adiciona adubação química (adubo NPK) e se ajusta o pH (correção via calagem). O material argiloso costuma vir de lugares denominados "áreas de empréstimo" que também serão degradados durante a extração. Há custos envolvidos na extração e na disposição do material da área de empréstimo, de modo que é relevante buscar materiais substitutos para minimizar sua utilização.

Assim, o objetivo geral desta pesquisa foi produzir substrato (solo construído) a partir da mistura de rejeito de carvão, valendo-se de resíduos de outros processos como fonte de alcalinidade, de nutrientes e de matéria orgânica, passível de ser usado em recuperação de áreas degradadas de mineração de carvão.

2 MATERIAL E MÉTODO

Quatro materiais foram selecionados e caracterizados para serem utilizados neste estudo, sendo que cada um tem sua função dentro do objetivo deste estudo. São eles:

- Rejeito de carvão proveniente do beneficiamento do circuito de grossos da mina Verdinho – substrato principal;

- Escória de aço ao carbono de aciaria – fonte de alcalinidade e nutrientes;
- Lodo de reator UASB de ETE da CASAN Criciúma após tratamento de efluente doméstico – fonte de matéria orgânica e nutrientes;
- Cinza de casca de arroz obtida em arrozeira no RS – auxiliar na estruturação física do substrato final;

Removeu-se do rejeito a maior parte de seu material carbonoso e piritoso por meio de separação densimétrica com líquidos orgânicos, retirando-se a fração flutuada em $2,2 \text{ g cm}^{-3}$ e a afundada em $2,6 \text{ g cm}^{-3}$. Somente o rejeito com densidade entre $2,2$ e $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ foi mantido tendo sido britado, moído abaixo de 2 mm . Após, o rejeito foi caracterizado em termos de enxofre total (analisado em equipamento LECO), análise imediata (ASTM, 2007) e determinação de potencial de acidez (AP). A escória foi britada, moída e analisada em termos de potencial de neutralização (NP).

Calculou-se uma mistura rejeito/escória neutra valendo-se de balanço ácido-base conforme método Sobek Tradicional (ou ABA na sigla em inglês) desenvolvido por Sobek *et al.* (1978). Este método contrapõe o potencial de acidificação (AP) ao potencial de neutralização (NP) de um dado material e, quando aplicável, determina a relação mássica entre esses materiais com vistas à obtenção de um meio neutro (solo neste caso).

O lodo de ETE foi seco, destorroadado e analisado conforme CONAMA 375/2006 (Brasil, 2006). O teor de carbono orgânico foi considerado para definir sua taxa de aplicação de forma tal que a mistura final chega-se a 3% de matéria orgânica (MO). A cinza de casca de arroz, tida como melhorador físico do solo, foi levemente cominuída e sua taxa de aplicação considerou 2% m/m com respeito ao rejeito correspondendo a 40 t ha^{-1} . A aplicação de cinza de casca de arroz a solos está amparada pela Diretriz Técnica N^o. 002/2011 da FEPAM (FEPAM, 2011) e por estudos de Dutra Jr *et al.* (2014), Guerrini e Trigueiro (2004) e Islabão (2013).

Vasos de 2,5 litros foram cultivados sequencialmente com Aveia Preta (*Avena strigosa*), Ervilhaca (*Vicia sativa*) e Milho (*Zea mays*) por um período total de 18 meses (em triplicata). Após, a capacidade dos vasos foi ampliada para 10 litros e

neles cultivou-se Azevém (*Lolium multiflorum*) por um período adicional de quatro meses.

O solos foram analisados em termos de fertilidade, são eles: pH do solo (1:1), Índice SMP, acidez potencial (H+Al), acidez trocável (teor de alumínio), capacidade de troca de cátions (CTC), matéria orgânica (MO), fósforo disponível, potássio/cálcio/magnésio trocáveis, enxofre total e extraível, saturação de bases e de alumínio e cobre, ferro, zinco e manganês totais, conforme EMBRAPA (1997) e metais ambientalmente disponíveis conforme abertura EPA 3050 (US EPA, 1996).

O tecido foliar da Aveia Preta e do Azevém foi investigado em termos de concentração de nutrientes, abertura nítrico perclórica (EMBRAPA, 1997). Optou-se por avaliar somente o tecido vegetal no primeiro e último ciclo, pois os cultivos intermediários foram estabelecidos para manter-se o solo coberto e com diferentes sistemas radiculares em crescimento.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A Tabela 1 apresenta os resultados para o rejeito de carvão em termos de análise imediata e enxofre total. Os resultados permitem observar que a retirada da fração com densidade superior a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ não implicou na remoção de todo o enxofre do rejeito havendo 0,8% residuais. O mesmo vale para o material carbonoso, haja vista que a análise imediata mostra cinzas da ordem de 80% e carbono fixo, de 1%.

Tabela 1 - Análise imediata e teor de enxofre total do rejeito.

Caracterização do rejeito	(%)
Cinzas	83,0
Matéria volátil	8,0
Carbono fixo	1,0
Teor de enxofre	0,8

Resultados para o balanço ácido base (ABA) entre rejeito beneficiado e escória aço carbono estão na Tabela 2. Percebe-se que não foi identificado NP no rejeito de carvão e tampouco AP nos materiais alcalinos e que a relação mássica entre ambos é de 19:1. Daniels (1996), trabalhando com estéreis contendo 1% de enxofre pirítico,

encontrou valores médios iguais a 32 kg $\text{CaCO}_3\text{t}^{-1}$ assemelhando-se ao encontrado neste estudo.

Tabela 2 - Balanço ácido-base (ABA) para rejeito e escória e relação mássica entre ambos.

	AP (kg $\text{CaCO}_3\text{t}^{-1}$)	NP (kg $\text{CaCO}_3\text{t}^{-1}$)	NNP (kg $\text{CaCO}_3\text{t}^{-1}$)
Rejeito	25,0	0,0	-25,0
Escória aço carbono - NNP	0	488,1	+488,1
		Relação Rejeito:Escória	19:1

AP - potencial de acidificação

NP - potencial de neutralização

NNP - potencial de neutralização líquido (PN - PA)

A presença de AP no rejeito é coerente com sua caracterização uma vez que há enxofre no mesmo e que em rejeitos de carvão de SC predomina enxofre pirítico em detrimento de enxofre sulfático ou orgânico. Ainda assim, sua utilização para fins ambientais é facilitada com respeito ao rejeito “bruto” uma vez que menores quantidades de alcalinizante serão necessárias para ajustar seu pH a valores adequados à implantação de vegetação.

O resultado de caracterização do lodo de ETE conforme CONAMA 375/2006 está na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados analíticos de lodo – ETE Criciúma e valores máximos admissíveis conforme CONAMA 375/2006.

Parâmetro	ETE	Valor máx. CONAMA 375/2006
C	%	21,5
C- orgânico	%	18
P	%	1,2
K	%	0,13
Ca	%	1,7
Mg	%	0,6
S	%	6,7
As	mg kg ⁻¹	16
Ba	mg kg ⁻¹	< 4
Cd	mg kg ⁻¹	< 0,2
Pb	mg kg ⁻¹	28
Cu	mg kg ⁻¹	69
Cr	mg kg ⁻¹	45
Hg	mg kg ⁻¹	0,15
Mo	mg kg ⁻¹	< 0,2
Ni	mg kg ⁻¹	16
Se	mg kg ⁻¹	< 4
Zn	mg kg ⁻¹	596

n.a. não se aplica

Os valores apresentados estão de acordo com os limites impostos por esta resolução não havendo restrições ambientais quanto à sua disposição em solos desde que as concentrações finais em solos não venham a ultrapassar os valores naturais dos solos no local de disposição.

Considerando-se o teor de carbono orgânico (C-org) no lodo, e que se arbitrou um solo com 3% de matéria orgânica (MO), foram adicionadas 97 g de lodo kg^{-1} de rejeito (peso seco) o que correspondeu a uma taxa de aplicação de 194 t ha^{-1} .

3.2 FERTILIDADE

A fertilidade de um solo diz respeito a sua capacidade de ceder nutrientes essenciais às plantas em quantidades adequadas e livre de substâncias tóxicas. Para que isto ocorra os nutrientes devem estar em sua forma disponível e em concentrações adequadas.

Valores médios para os parâmetros de fertilidade analisados neste experimento estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios (n=3) para acidez, CTC, matéria orgânica e macronutrientes.

Parâmetro	Valor	SBCS, 2004
pH	7,4	-
Índice SMP	7,4	-
Acidez potencial H+Al - cmolc dm^{-3}	0,9	-
Alumínio - cmolc dm^{-3}	0,0	-
CTC - cmolc dm^{-3}	26	Alta
MO - %	1,4	Baixo
Fósforo - mg dm^{-3}	113	Muito alto
Potássio - mg dm^{-3}	143	Alto
Cálcio - cmolc dm^{-3}	20,5	Alto
Magnésio - cmolc dm^{-3}	4,0	Alto
Enxofre total - %	1,1	-
Enxofre extraível - g kg^{-1}	2,7	Alto
Saturação bases - V%	96,6	-
Saturação alumínio - m%	0,0	-
Cu - mg dm^{-3}	0,2	Médio
Fe - g dm^{-3}	> 5,0	Alto
Zn - mg dm^{-3}	45,8	Alto
Mn - mg dm^{-3}	9,0	Alto

pH_(1:1), Índice SMP, P Mehlich 1, K_{troc}, Mehlich 1, Ca_{troc}, Mg_{troc}, e Mn_{troc}, KCl 1 mol L^{-1} , S-SO₄ CaHPO₄ 500 mg L^{-1} , Zn e Cu HCl 0,1 mol L^{-1} , B água quente e MO digestão úmida.

A faixa de pH do solo (7,4) ficou acima do calculado por meio do balanço ácido base. O resultado pode ser explicado em termos cinéticos uma vez que a pirita presente no rejeito (enxofre) pode levar semanas ou meses para oxidar enquanto os alcalinizantes presentes em escórias (óxidos de cálcio) são rápidos. Assim, espera-se que com o passar do tempo ocorra acidificação do solo podendo o pH cair para valores de até 5,5 sem o comprometimento da fertilidade. Para fins práticos consideram-se valores entre 6,0 e 6,5 (POTAFOS, 1998; SBCS, 2004) ou 5,5 e 6,0 (WIETHOLTER, 2000) como sendo adequados para a maioria das culturas comerciais uma vez que nestas faixas de pH ocorre a maior disponibilidade de macro e micronutrientes na solução do solo.

A acidez trocável (Al) e a potencial (H+Al) apresentam valores coerentes com a acidez ativa (pH) os quais, em conjunto, repercutem positivamente quando aliados a alta CTC, alta saturação por bases com cátions básicos (Ca, K e Mg) e baixa saturação por Al e H (cátions ácidos) como neste caso.

Quanto à matéria orgânica, ainda que a mistura com lodo tenha objetivado uma mistura final com 3%, a análise química indica a metade deste valor.

No que diz respeito aos teores de nutrientes, os resultados mostram altos teores dos mesmos, vindos tanto do lodo quanto da escória. Ressalta-se, contudo, que o que interessa sob o ponto de vista agrônomo não é seu valor absoluto, mas sim o montante disponível para as plantas. No caso do fósforo, por exemplo, em maiores valores de pH há menor adsorção em óxidos aumentando sua disponibilidade para fauna e flora ou mesmo sua perda por lixiviação, contudo, se o pH atingir valores alcalinos ele pode vir a ser indisponibilizado, pois haverá formação de apatita (KAMPRATH, 1956; CASAGRANDE *et al.*, 2003).

Ainda com respeito ao fósforo, deve-se chamar a atenção para outra questão: os ânions PO_4^{3-} e SO_4^{2-} competem pelos mesmos sítios de adsorção no solo. No entanto o sulfato é preterido, o que facilita sua absorção pelas plantas e também perdas por lixiviação.

Todos os valores para micronutrientes são considerados altos conforme SBCS (2004).

3.3 METAIS AMBIENTALMENTE DISPONÍVEIS

A Tabela 5 mostra valores médios para Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, e Zn ambientalmente disponíveis nas amostras de solos e valores de referência.

Os resultados mostram-se abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, exceto para o cromo. No entanto, sua concentração ainda está abaixo do limite para investigação agrícola desta mesma resolução.

Complementarmente, o levantamento de solos de Huguen (2010) para Santa Catarina mostra grande variação nos valores de referência para os referidos metais em função dos teores de argila, silte, pH e CTC do material analisado indicando que solos compostos a partir de rejeitos deverão atender características locais e regionais.

Tabela 5 – Concentração média (n=3) de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn após abertura EPA 3050, valores CONAMA 420/2009 e valores de referência máximos para Santa Catarina.

mg kg ⁻¹	Solos (n=3)	CONAMA 420/2009*		Valores de referência**		
		Prevenção	Investigação Agrícola	Média	Min	Max.
Cd	<0,002	1,3	3	-	-	-
Co	10	25	35	-	-	-
Cr	109	75	150	112	59,6	216,1
Cu	43	60	200	111	9,0	841,6
Ni	24	30	70	32	1,9	218,8
Pb	18	72	180	12	17,8	60,3
Zn	115	300	450	61	37,3	180,9

Fonte*: Brasil (2009)

Fonte*: Huguen (2010)

Com respeito ao cromo, único elemento com concentração acima dos valores de prevenção do CONAMA 420, sua forma mais comum e estável é o Cr^{3+} a qual é insolúvel no solo tendendo a acumular-se nas raízes fibrosas das plantas sendo pouco transferido para a parte aérea das mesmas. Já o Cr^{6+} é tóxico, mas quando liberado no meio ambiente é majoritariamente reduzido a Cr^{3+} . Dentre os redutores de Cr^{6+} para Cr^{3+} estão numerosas substâncias orgânicas e compostos de enxofre e ferro presentes em minerais como hematita e pirita (BUERGE e HUG, 1999; LAN *et al.*, 2007), presentes no sistema.

3.4 TECIDO VEGETAL

A Tabela 6 mostra os valores médios em tecido vegetal da Aveia Preta e do Azevém bem como valores padrão para ambas as culturas.

Em termos gerais, macro e micro nutrientes mostraram-se dentro ou acima da faixa ótima esperada mostrando o adequado suprimento dos mesmos pelo solo em estudo. É importante lembrar que o comportamento dos nutrientes em tecido vegetal está vinculado não só à sua disponibilidade e concentração no substrato, mas também em sua relação com parâmetros como pH, Eh, saturação dos complexos de troca, mineralogia entre outros.

Tabela 6 – Nutrientes em tecido vegetal de Aveia Preta e Azevém (n=3) e valores padrão de literatura.

Nutriente		Aveia Preta	referência*	Azevém	referência**
Cálcio	g kg ⁻¹	6,2	2,5 - 5,0	5,6	5,8
Fósforo	g kg ⁻¹	17,8	2,0 - 5,0	2,6	0,25 – 2,5
Magnésio	g kg ⁻¹	3,4	1,5 - 5,0	1,6	1,8
Potássio	g kg ⁻¹	32,9	15 - 30	16,7	15 – 20
Cobre	mg kg ⁻¹	1,1	5 - 25	6,3	-
Ferro	mg kg ⁻¹	91	40 - 150	219,0	-
Manganês	mg kg ⁻¹	279	25 - 100	140,7	-
Zinco	mg kg ⁻¹	72,6	15 - 70	63,7	-

Fonte*: Camargo *et al.*, 1996

Fonte**: Matos *et al.*, 2005

3.5 ESCÓRIA E LODO DE ETE EM SOLOS DE MINERAÇÃO

Estudos referentes à implantação de cobertura vegetal em rejeito de carvão mostram a necessidade de elevar e manter o pH do solo próximo à neutralidade ainda que esta não seja a única variável a ser considerada. Cabe lembrar que a alcalinidade será consumida ao longo do tempo e do espaço (em profundidade), cabendo monitoramento permanente e aplicações subsequentes de material alcalinizante se necessário (LI *et al.*, 1998 e LIU e LAL, 2014).

A alcalinização é normalmente realizada mediante aplicação de calcário ainda que possam ser encontrados substitutos no mercado como gesso (ainda que não seja corretivo), silicatos de Ca, Mg e termofosfatos (RAMOS *e.a.l.*, 2006), cal virgem agrícola e cal hidratada agrícola (ALCARDE, 1992), cinza de casca de arroz (ISLABÃO, 2013) e escórias (QUAGGIO, 2000; WUTKE e GARGANTINI, 1962).

Esses materiais podem fornecer outros elementos, como: Ca, Mg, K e S ou ainda Na (observar salinização).

As escórias são resíduos da indústria siderúrgica cuja base são óxidos de cálcio e de magnésio, possuem micronutrientes em menor concentração e são mais solúveis que calcários agindo com rapidez sobre o meio. O uso de escória como corretivo agrícola é realizado atendendo Portaria nº 3 de 1986. (BRASIL, 1986).

Com respeito ao lodo de ETE (biossólidos), vários trabalhos têm sido publicados considerando seu uso como fonte de nutrientes e matéria orgânica em solo agrícola (ANDREOLI e PEGORINI, 2003; LEMAINSKI e da SILVA, 2006; CORREA *et al.*, 2007; GARCIA *et al.*, 2009; QUINTANA *et al.* 2011; MACEDO *et al.*, 2012;) e em áreas degradadas por mineração (RATE *et al.*, 2004; HALOFSKY e McCORMICK, 2005; CORREA e BENTO, 2010; GARDNER *et al.*, 2012). São observados efeitos não apenas sobre o crescimento vegetal, mas também melhorias físicas e biológicas (USSIRI e LAL, 2005; SHEORAN *et al.*, 2010; TIAN *et al.*, 2013; LIU e LAL, 2014; WATERHOUSE *et al.*, 2014a; WHATERHOUSE, 2014b; TRIPATHI, 2014; TIAN *et al.*, 2015).

De modo geral, entende-se que os benefícios da adição de nutrientes (principalmente P e N) e compostos orgânicos (MO) repercutem positivamente no estabelecimento e na manutenção de uma cobertura vegetal permanente e saudável sobre antigas cavas em recuperação. Reduz, também, a percolação de água e oxigênio pelo perfil limitando, portanto, a geração de lixiviados ácidos associados a uma maior estabilidade na superfície com menores perdas por erosão (DANIELS *et al.*, 2010).

4 CONCLUSÕES

O rejeito de carvão dessulfurizado e moído pode ser usado como componente principal de um solo fabricado. Contudo, o teor de enxofre residual do rejeito (0,8%) demanda a adição de aditivos alcalinos e a carência de nutrientes exige fonte de matéria orgânica para supri-los, além de um componente que auxilie na estrutura física. A correção da acidez pode ser realizada com escória de aciaria, a adição de matéria orgânica com lodo

de estações de tratamento de esgoto e o melhoramento físico com cinza de casca de arroz.

Nas condições experimentais, a mistura balanceada desses resíduos, apresentou propriedades químicas (fertilidade) em níveis adequados para o bom desenvolvimento de aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum*). Foram encontrados teores de Cd, Co, Cu, Ni, Pb, e Zn ambientalmente disponíveis em concentrações abaixo do limite prevenção prevista na Resolução CONAMA 420. Exceção foi o cromo que ficou acima do valor de prevenção, mas abaixo do limite de intervenção agrícola desta resolução.

O uso de materiais alternativos em áreas degradadas após mineração de carvão configura-se como opção à disposição dos mesmos em módulos de rejeito e aterros sanitários, auxiliando na mitigação e/ou redução dos impactos ambientais relacionados a extração e beneficiamento deste bem mineral na região sul do Brasil.

5 REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C. **Corretivos de acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional Para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas - ANDA, 1992. 43 f. Boletim Técnico n. 6
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E.S. Reciclagem agrícola de biossólidos: Impactos e Regulamentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 29. 2003, Ribeirão Preto, **Anais ...** Ribeirão Preto, SBCS, 2003.
- ASTM. American Society for Testing and Material, 2007. ASTM D 3172: Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke.
- BIAN, Z.; INYANG H.I.; DANIELS J.L.; OTTO F.; STRUTHERS S. Environmental issues from coal mining and their solutions. **Mining Science and Technology** v.20. p. 0215–0223, 2010.
- BRASIL. Portaria no. 3, de 12 de junho de 1986. Classifica os calcários agrícolas em função do PRNT. **Diário Oficial**, Brasília, 1986. Seção I, p. 8673
- BRASIL, Resolução **CONAMA 375 / 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
- BRASIL, Resolução **CONAMA 420 / 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.
- BUERGE, I.; HUG, S. Influence of Mineral Surfaces on Chromium (VI) Reduction by Iron (II). **Environmental Science Technology**, v.33, p. 4285-4291, 1999.
- CAMARGO, C. E. O.; FREITAS, J. G.; CANTARELLA, H. Aveia e centeio. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. *et al.* (Ed.) Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p. 52-53. Boletim Técnico, 100.
- CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. and BORGES, M.. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 27, n. 1, Feb. 2003
- CORREA, R.S.; FONSECA, M.F.; CORREA, A.S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.420–426, 2007.
- CORREA, R.S.; BENTO, M.A.B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p. 1435-1443, 2010.
- DANIELS. W. L. Manipulating the chemical properties of mine soils and mining wastes. In: ALVARES V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., ed.. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS, 1996, p.867-897.
- DANIELS, W.L.; ZIPPER, C.E. **Creation and management of productive mine soils**: Virginia Cooperative Extension, Reclamation Guidelines for Surface Mined Land in Southwest Virginia, Powell River Project, Petesburg: Virginia Polytechnic Institute and State University Publication 460-121, 2010.
- DUTRA JR., L.A.; TUCHETENHAGEN, I.K.; de LIMA, C.L.R.; STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; VAHL, L.C. Resistência tênsil, densidade e porosidade de um Argissolo submetido a diferentes doses de cinza de casca de arroz. In: **Reunião Sul-brasileira de Ciência do Solo, 10**. Pelotas: NRS-SBCS, 2014. 4 f.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. **Soil: morphology, genesis and classification**. New York: WILEY, 1989. 395p

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. Gestão de resíduos caracterizados como casca de arroz e cinzas resultantes do processo de queima da casca. Porto Alegre: FEPAM, 2011. **Diretriz Técnica No. 002**.

FRIPP, J.; ZIEMKIEWICS, P.F.; CHARLAVORK, H. **Acid mine drainage treatment**. Vicksburg: EMRRP Technical Notes Collection, 2000, 7p. ERDC TN-EMRRPSR-14.

GARCIA, G.O.; GONÇALVES, I.Z.; MADALÃO, J.C.; NAZÁRIO A.A.; BRAGANÇA, H.N. Características químicas de um solo degradado após a aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Revista Verde** v.4, n.2, p.01 - 12, 2009.

GARDNER, W.C.; NAETH, M.A.; BROERSMA, K.; CHANASYK, D.; HOBSON, A.. Influence of biosolids and fertilizer amendments on element concentrations and revegetation of copper mine tailings. **Canadian Journal of Soil Science**. v.92,p. 89-102, 2012.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M... Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biosólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 1069-1076, 2004.

HALOFSKY, J.E., McCORMICK, L.H.. Effects of unseeded areas on species richness of coal mines reclaimed with municipal biosolids. **Restoration Ecology**, v.13, n.4, p.630-638, 2005.

HUGEN, C. **Valores de referência para teores de Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em solos do Estado de Santa Catarina**.2010. 71f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestre em Manejo de Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2010.

ISLABÃO, G.O. **Uso de cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013, 80p.

JUWARKAR, A.S.; A JUWARKAR,; KHANNA, P. Use of selected waste materials and biofertilizers for industrial solid waste reclamation. In: TWARDOWSKA,I.; ALLEN, H.E.; KETTRUP,A.A.F.; LACY, W.J. (Ed.) **Solid Waste: Assessment, Monitoring And Remediation**, Elsevier, 2004. cap. VI.7, p. 911-948.

KAMPRATH, E. J.; NELSON, W. L.; FITTS, J. W. The Effect of pH, Sulfate and Phosphate Concentrations on the Adsorption of Sulfate by Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 20, n. 4, p. 463-466, 1956.

KENT, M. Plant growth problems in colliery spoil reclamation: a review. **Applied Geography**, Plymouth, n. 2, p.83-107, 1982.

KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In:CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ, M.A. (Eds.). **Effluent treatment in the mining industry**. Concepción: University of Concepción, 1998, p. 57-118.

LAN, Y.; DENG, B.; KIM, C.; THORNTON, E. Influence of soil minerals on chromium(VI) reduction by sulfide under anoxic conditions.**Geochemical Transactions**, v.8, n.4, 10 f. 2007.

LEMAINSKI, J.; da SILVA, J.E.. Utilização do biossólido da CAESB na produção de milho no distrito federal. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.741-750, 2006.

LI, R.; DANIELS, L; STEWART, B. Influence of liming and topsoil thickness on vegetative growth and leachate quality of acidic coal refuse. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR SURFACE MINING AND RECLAMATION. 15. 1998, West Fork. Proceedings ... National Meeting of the American Society for surface mining and reclamation, **Proceedings...**St. Louis: ASMR, 1998. p.323-337

LIU, R.; LAL, R. Quality Change of Mine Soils From Different Sources in Response to Amendments: A Laboratory Study. **Environment and Natural Resources Research**, v. 4, n.2, 2014

MACEDO, F. G.; de MELO, W.J.; MERLINO, L.C.S.; TORRES, L.S.; GUEDES, A.C.T.P.; de MELO, G.M.P.; CAMACHO, M.A. Lodo de esgoto como fonte de nitrogênio: concentração no perfil do solo e em plantas de milho. **Eng Sanit Ambiental**, v.17, n.3, p. 263-268, 2012.

MATOS, A.T.; PINTO, A.B.; PEREIRA O.G.; BARROS, F.M. Extração de nutrientes por forrageiras cultivadas com água residuária do beneficiamento de frutos de cafeeiro. **Revista Ceres**, v.52, n.303, p. 675-688, 2005.

McCLOY, D.V.; SENCINDIVER, J.C. Acid minesoil properties relating to sulfurization. In:____ **Agronomy Abstracts**. Madison: ASA. p. 4, 1991. Appendix 2.

POTAFOS - INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 111 p.

QUINTANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W.J. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, v.8, n.1, abr.2011.

RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; DE CAMARGO, M.S.. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.849-857, 2006.

RATE, A.W.; LEE, K.M.; FRENCH, P.A.. Application of biosolids in mineral sands mine rehabilitation: use of stockpiled topsoil decreases trace element uptake by plants. **Bioresource Technology**, v.91, p. 223–231, 2004.

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. 1-21. jan. 2010.

SOBEK, A.A.; SCHULLER, W.A.; FREEMAN, J.R.; SMITH, R.M. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils**, 1978, p. 204. U.S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/2-78-054.

SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004.

TIAN, G.; CHIU, C.; FRANZLUEBBERS, A.J.; OLADEJI, O.O.; GRANATO, T.; COX, A.E.. Biosolids amendment dramatically increases sequestration of crop residue-carbon in agricultural soils in western Illinois. **Applied Soil Ecology**, v. 85, p. 86–93, 2015.

TIAN, G.; FRANZLUEBBERS, A.J.; GRANATO, T.C.; COXA, A.E.; O'CONNOR, C.. Stability of soil

organic matter under long-term biosolids application. **Applied Soil Ecology**, v.64, p. 223–227, 2013.

TRIPATHI, N; SINGH, R.S.NATHANAIL, C.P.; Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment. **Science of the Total Environment**, v.468–469, p. 1162–1171, 2014.

US EPA - US Environmental Protection Agency. **Method 3050**. SW-846. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils, Washington, 1996.

USSIRI, D.A.N.; LAL, R. Carbon Sequestration in Reclaimed Minesoils. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.24, p. 151-165, 2005.

WATERHOUSE, B.R.; ADAIR, K.L.; BOYER, S.; WRATTEN, S.D.. Advanced mine restoration protocols facilitate early recovery of soil microbial biomass, activity and functional diversity. **Basic and Applied Ecology**, v. 15, p. 599–606, 2014a.

WATERHOUSE, B.R.; ADAIR, K.L.; BOYER, S.; WRATTEN, S.D..Using municipal biosolids in ecological restoration: What is good for plants and soil may not be good for endemic earthworms. **Ecological Engineering**, v. 70, p. 414–421, 2014b.

WIETHOLTER, S. **Calagem no Brasil**, Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000.

WUTKE, A.C.P. & GARHANTINI, H. Avaliação da possibilidades de escórias de siderúrgica como corretivos de acidez dos solos. **Bragantia**, v.21, n.46, p. 795-805, 1962.