

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE SOLOS CONSTRUÍDOS APÓS  
MINERAÇÃO DE CARVÃO NA MINA BOA VISTA,  
MUNICÍPIO DE MINAS DO LEÃO, RS

Oscar Rafael Gadea Quiñones  
(Dissertação)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE SOLOS CONSTRUÍDOS APÓS  
MINERAÇÃO DE CARVÃO NA MINA BOA VISTA,  
MUNICÍPIO DE MINAS DO LEÃO, RS

Oscar Rafael Gadea Quiñones  
Engenheiro-Agrônomo (Universidad Nacional de Asunción - Paraguai)

Dissertação apresentada como  
um dos requisitos à obtenção do  
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil  
Março de 2004

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo da Faculdade de Agronomia, pela oportunidade da realização deste curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao professor Nestor Kämpf, idealizador do projeto.

Aos professores Elvio Giasson e Alberto Inda Jr., pela orientação, compreensão, dedicação e, sobretudo, pela amizade.

Aos professores Carlos Alberto Bissani, Luiz Fernando Spinelli Pinto e Deborah Pinheiro Dick, pelas orientações e colaborações no trabalho.

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM), pela disponibilidade da área de estudo e das coletas de campo e aos técnicos da Companhia pela disposição no esclarecimento das questões técnicas relacionadas à mina.

Aos colegas do curso de Pós-graduação, especialmente a João Paulo, Alejandra, Mariel, Frederico, Gustavo, Claudia e Edir, pelo apoio constante.

Ao funcionário do Laboratório de Química, Adão Luis dos Santos, pelo auxílio nas coletas e análises e pela amizade.

À estagiária Eliane da Rosa, pelo auxílio nas análises físicas e químicas.

Aos meus pais e meus sogros, Oscar, Maria, Delfin e Elba, pelo apoio incondicional.

À minha família, em especial à minha esposa Fátima e ao meu filho Diego, por terem sido fieis companheiros nos bons e maus momentos passados.

# **CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE SOLOS CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO NA MINA BOA VISTA, MUNICÍPIO DE MINAS DO LEÃO, RS <sup>1</sup>**

Autor: Oscar Rafael Gadea Quiñones  
Orientador: Prof. Elvio Giasson  
Co-Orientador: Prof. Alberto V. In da Junior.

## **RESUMO**

A mineração de carvão em lavra a céu aberto provoca a mistura dos materiais subjacentes ao carvão e que são, posteriormente, utilizados no preenchimento das cavas mineradas. O processo de construção dos solos e a mistura podem ocasionar problemas ambientais pelas alterações químicas e físicas provocadas nos solos construídos. A fim de comparar solos construídos de diferentes idades, caracterizou-se a coluna geológica, o solo natural original e solos construídos de 2 anos e de 24 anos da mina de carvão Boa Vista, no Município de Minas do Leão, RS. A descrição morfológica do perfil do solo e as análises químicas e físicas demonstram que os solos construídos apresentam sérias limitações físicas, impedindo o desenvolvimento normal da vegetação. Ademais, diferenças químicas entre os perfis de diferentes idades originam-se principalmente da utilização de materiais geológicos e processos de construção distintos, do que pelos processos pedogenéticos. Quanto à evolução temporal dos solos construídos, observou-se que está fortemente caracterizada pela intemperização ácido-sulfatada, intensificando-se na sub-área mais antiga. O potencial de acidificação e o potencial de neutralização determinados na coluna geológica indicam a existência de camadas com alto potencial gerador de Drenagem Ácida de Minas, recomendando-se o cuidado na deposição final destas camadas. Os resultados deste estudo indicam que as propriedades químicas e físicas determinadas nos solos construídos servem como indicadores para o monitoramento de áreas construídas, visando a prevenção de danos ambientais.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (107 p.) Fevereiro, 2004. Trabalho realizado com apoio financeiro da CAPES e CNPq.

# **CHARACTERIZATION AND GENESIS OF CONSTRUCTED SOILS IN COAL MINE AREAS IN THE BOA VISTA COAL MINE, MINAS DO LEÃO, RS, BRAZIL<sup>1</sup>**

Author: Oscar Rafael Gadea Quiñones

Major Advisor: Associate Professor Elvio Giasson

Minor Advisor: Associate Professor Alberto V. Inda Junior.

## **SUMMARY**

Open pit coal mining causes the mixture of the materials used in the filling of the abandoned mine workings. Such mixture can cause environmental problems because of the chemical and physical alterations in constructed soils. In order to compare constructed soils of different ages, it was made a characterization of the geologic column, of the natural soil, and of constructed soils 2 and 24 years old in the Boa Vista coal mine, located in Minas do Leão, RS, Brazil. Morphological description and physical and chemical analyses indicate that the constructed soils present serious physical limitations, reducing the normal development of vegetation. Additionally, differences in chemical properties between soil profiles of the two constructed soils derived from the use of different geologic materials and processes of construction than by the pedogenetic processes. The evolution of constructed soils is strongly influenced by the acid-sulfate weathering that is more intense in the oldest sub-area. acidification potential and neutralization potential determined in the geologic column indicate the existence of layers with high potential of generation of acid mine drainage, which have to have special management when deposited or disposed. The results of this study indicate that some chemical and physical properties of constructed soils may be used as indicators in monitoring constructed areas, aiming the prevention of environmental damages.

---

<sup>1</sup> M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (107 p.) February, 2004.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Importância econômica da mineração do carvão.....	4
2.2 Processos de lavra do carvão.....	4
2.3 Processo de recuperação.....	6
2.4 O processo de sulfurização .....	7
2.5 Oxidação da pirita .....	8
2.6 Drenagem ácida de mina .....	10
2.7 Transformações decorrentes da acidificação .....	14
2.8 Meio ambiente e mineração.....	15
2.9 Legislação ambiental.....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1 Características da área de estudo e dos processos de mineração e construção .....	19
3.1.1 Aspectos geológicos e pedológicos da bacia carbonífera Leão-Butiá.....	19
3.1.2 Clima e vegetação da bacia carbonífera Leão-Butiá.....	21
3.1.3 Mina de carvão Boa Vista .....	21
3.1.3.1 Características do processo de lavra e reposição .....	25
3.1.3.2 Processo de beneficiamento e queima do carvão .....	27
3.2 Seleção das áreas de estudo .....	27
3.3 Seleção dos perfis para amostragem e descrição morfológica .	28
3.4 Análises físicas .....	29
3.5 Análises químicas .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1 Características morfológicas .....	38
4.2 Características físicas .....	44
4.2.1 Textura .....	44

4.2.2 Densidade do solo e condutividade hidráulica saturada ....	47
4.2.3 Infiltração de água .....	50
4.3 Características químicas .....	54
4.3.1 Estágios de intemperização .....	67
4.3.2 Potenciais de acidificação e neutralização .....	71
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>7. APÊNDICES .....</b>	<b>85</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Valores médios de distribuição de tamanho de partículas de solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no solo natural, nos solos construídos SA-24 e SA-2 e na coluna geológica .....	45
2. Densidade do solo ( $D_s$ ) e condutividade hidráulica saturada ( $K$ ) dos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	48
3. Propriedades químicas do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	55
4. Elementos químicos determinados no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	68
5. Estimativas do potencial de acidificação (PA) e do potencial de neutralização (PN) das camadas da coluna geológica .....	72
6. Estimativas médias do PA e PN da coluna geológica e dos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	75

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Relação entre o pH do solo e a quantidade de cátions trocáveis básicos e ácidos (Pinto & Kämpf, 2002) .....	15
2. Situação das principais jazidas de carvão no RS (Pinto, 1997)	20
3. Localização e vias de acesso à mina de carvão Boa Vista, conforme CRM (2000a) (SA-2: sub-área de solo construído de 2 anos, SA-24: sub-área de solo construído de 24 anos).....	22
4. Perfil simplificado da coluna geológica da mina de carvão Boa Vista (adaptado de CRM 2000b) .....	24
5. Perfil P2-2 (esquerda) e perfil P3-2 (direita) da sub-área de solos construídos SA-2 .....	40
6. Perfil P2-24 (esquerda) e perfil P3-24 (direita) da sub-área de solos construídos SA-24 .....	40
7. Acumulação superficial de acículas no perfil P4-24 .....	41
8. Valores médios da distribuição do tamanho de partículas do solo natural (SN), solos construídos SA-24 e SA-2 e coluna geológica (CG) .....	46
9. Médias da densidade do solo e da condutividade hidráulica saturada das sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2 ....	48
10. Taxa de infiltração de água no solo natural .....	51
11. Taxa de infiltração de água no solo nos perfis P1-24, P2-24, P3-24 e P4-24 da sub-área de solos construídos SA-24 .....	51
12. Taxa de infiltração de água no solo nos perfis P1-2, P2-2 e P3-2 da sub-área de solos construídos SA-2 .....	52
13. Taxa final média de infiltração de água no solo do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2 .....	53
14. Valores médios de pH em água, pH em KCl e índice SMP do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	56

15.	Médias das concentrações de Ca, Mg, Na e K no solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2 .....	59
16.	Valores médios da soma de bases (S) e saturação por bases (V) do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2 .....	61
17.	Valores médios de Al trocável, H+Al e saturação por Al no solo natural, solos construídos SA-24 e solos construídos SA-2 .....	63
18.	CTC efetiva e CTC a pH7 do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2 .....	65
19.	Teor médio de CO no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2 .....	66
20.	Médias dos valores das relações moleculares $K_i$ e $K_r$ dos solos naturais e solos construídos SA-24 e SA-2 .....	71

## RELAÇÃO DE EQUAÇÕES

	Página
[1] $\text{FeS}_{2(s)} + 7/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ .....	8
[2] $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ .....	8
[3] $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_{3(s)} + 3\text{H}^+$ .....	8
[4] $\text{FeS}_{2(s)} + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$ .....	8
[5] $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$ .....	8
[6] $\text{FeS}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}^-$ .....	9
[7] $\text{FeS}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{S}^0 + 2\text{e}^-$ .....	9
[8] $\text{FeS}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 15\text{e}^-$ .....	9
[9] Teor de argila = (leitura densímetro + leitura da prova em branco) x 20.....	29
[10] Teor de areia = Pesagem da areia retida na peneira de 0,053 mm.....	29
[11] Teor de silte = 1000 – teor [argila (g) + areia (g)].....	29
[12] $K = 60\text{VL}/\text{Ath}$ .....	30
[13] $D_s = \text{massa do solo seco}/\text{volume do cilindro}$ .....	31
[14] Taxa de infiltração = $(\Delta h/\Delta t) \times 60$ (cm h <sup>-1</sup> ).....	32
[15] $\text{Al (cmol}_c\text{kg}^{-1}) = [V \text{ amostra (mL)} - V \text{ branco (mL)}] \times \text{HCl} \times 100 / \text{massa do solo (g)}$ .....	33
[16] $\text{H+Al (cmol}_c\text{kg}^{-1}) = [V \text{ amostra (mL)} - V \text{ branco (mL)}] \times M \text{ NaOH} \times \text{FC}$ .....	33

[17]	$K_i = [\% \text{ de SiO}_2 \times 1,7] / \% \text{ de Al}_2\text{O}_3$ .....	35
[18]	$K_r = (\% \text{ de SiO}_2 / 0,60) / [(\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 / 1,02) + (\% \text{ de Fe}_2\text{O}_3 / 0,60)]$ .....	35
[19]	$PN = [V \text{ branco (mL)} - V \text{ amostra (mL)}] \times \text{concentração base} \times 50 / \text{peso amostra (g)}$ .....	36
[20]	$PA = V \text{ gasto amostra (mL)} \times N \text{ base} \times 50 / \text{g amostra}$	36

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração de carvão constitui uma atividade que altera as características originais do solo, perturbando intensamente a paisagem. O planejamento da mineração do carvão deve contemplar a recuperação ambiental das áreas mineradas, conforme estabelece a legislação ambiental vigente.

A recuperação de áreas de mineração de carvão a céu aberto implica na utilização dos solos naturais e materiais litológicos subjacentes às camadas de carvão para a reposição da paisagem e construção dos solos, visando restituir a qualidade e a capacidade produtiva original dos solos onde deverá ser novamente estabelecida uma vegetação de cobertura.

Nas camadas litológicas subjacentes ao carvão, é comum encontrar materiais que não são utilizados para fins econômicos e são denominados de rejeitos ou estéreis. Entre estes materiais, destaca-se o mineral pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que, quando exposto a condições oxidantes, desencadeia fortes reações de acidificação nos solos.

A acidificação acentuada dos solos onde ocorre esta reação, pode causar deficiência nutricional nas plantas devido ao deslocamento e lixiviação dos cátions básicos e pela alta concentração de alguns elementos, tornando-os tóxicos e não permitindo o adequado desenvolvimento vegetal.

Como a exploração superficial do carvão mineral demanda a movimentação de grandes volumes de materiais estéreis, empregam-se equipamentos pesados nos processos de lavra, resultando na desestruturação original do solo e na compactação destes materiais durante a reconstituição da paisagem, originando-se também limitações físicas nos solos construídos. Estas limitações físicas igualmente dificultam o estabelecimento da cobertura vegetal, permitindo a ocorrência de erosão superficial e a conseqüente perda de solo, que por sua vez pode ocasionar o assoreamento dos corpos de água adjacentes.

Além dos problemas específicos localizados na área de mineração, outros problemas ambientais externos podem ocorrer em áreas vizinhas. Destes, destacam-se a contaminação das fontes hídricas causada pela drenagem ácida das minas e a contaminação do lençol freático por metais pesados liberados na dissolução de minerais produzidos no intemperismo ácido sulfatado.

Na coluna geológica, além do material estéril contendo pirita, podem ser encontradas camadas litológicas ricas em carbonatos e esmectitas, que são potencialmente aptas para neutralizar a acidez e reduzir a geração de drenagem ácida. A identificação destas camadas, assim como a quantificação dos carbonatos presentes nelas, pode contribuir significativamente para o planejamento dos trabalhos pós-mineração.

O conhecimento das propriedades químicas dos materiais componentes da coluna geológica permite melhorar as características dos solos construídos através da seleção dos materiais a serem utilizados no processo de construção das áreas mineradas. A identificação e caracterização destes materiais ajudam no planejamento anterior à mineração, conduzindo à correta disposição final dos rejeitos no processo de construção e reposição topográfica da paisagem, evitando, assim, a exposição de materiais com alto potencial de acidificação às condições oxidantes.

A interferência antrópica através do processo de mineração causa um desequilíbrio entre os solos construídos e as condições ambientais superficiais, acarretando uma série de mudanças nas propriedades e características destes solos. Portanto, o entendimento dos processos químicos e pedogenéticos ocorrentes nos solos construídos e a aplicação dos seus princípios ao correto planejamento permite a melhoria da qualidade destes solos.

Mediante um adequado planejamento, o preenchimento das cavas durante o processo de recomposição topográfica da paisagem favorecerá o cumprimento de leis e regulamentos, minimizando o risco de poluição ambiental e o custo de manutenção a longo prazo, rendendo benefícios econômicos à empresa e à sociedade.

O presente estudo objetiva: 1) caracterizar morfológica, química e fisicamente o solo natural, a coluna geológica e os solos construídos, 2) comparar características de solos construídos de diferentes idades, assim como 3) fornecer

subsídios para a melhoria das práticas de recuperação de áreas de mineração de carvão.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Importância econômica da mineração do carvão**

A mineração é de grande importância para a economia nacional, contribuindo indiretamente com cerca de 60% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (Lopes, 1998). Embora seja indiscutível a importância do carvão mineral, tanto para a geração de energia elétrica, como para a siderurgia, o processo de mineração pode originar graves problemas ambientais durante a extração, beneficiamento ou queima do carvão. A produção de energia gerada a partir do carvão normalmente é mais poluente do que outras fontes de energia como gás, biomassa, eólica ou solar (Sanchez & Formoso, 1990).

O carvão mineral constitui dois terços dos recursos energéticos não renováveis do Brasil, sendo suas reservas 20 vezes maiores do que as reservas de petróleo e 75 maiores que as reservas de gás natural. As reservas de carvão mineral do Estado do Rio Grande do Sul (RS) somam 28 bilhões de toneladas, significando 86,5% do total do Brasil e representando as maiores reservas de carvão do país (Sanchez & Formoso, 1990).

A crise energética da década de 70 levou a definição de um Plano Energético Federal que impulsionou a retomada e a ampliação da mineração do carvão, que passou a constituir uma das principais alternativas para atender a demanda energética da região Sul do país (Nunes, 2002).

### **2.2 Processos de lavra do carvão**

Os principais métodos de mineração de carvão no Brasil podem pertencer a dois grandes grupos: métodos de lavra a céu aberto e métodos de lavra subterrânea. A adoção de um dos métodos de lavra utilizado depende das

condições geológicas locais e da profundidade do carvão mineral. No Rio Grande do Sul, a mineração de carvão é feita principalmente a céu aberto (Koppe & Costa, 2002).

O primeiro tipo de lavra é representado pelo método em tiras “*stripping mining*” e suas variantes de execução, a descobertura com “*dragline*”, o uso de bancadas com escavadeiras/caminhões ou a lavra em blocos com combinação de trator e “*scraper*”. A lavra de subsolo é feita através de câmaras e pilares (*room and pillar*) e de caimento do teto (*longwall* e *shortwall*) (Koppe & Costa, 2002).

O método de lavra em tiras consiste na remoção em separado das camadas de solo superficial e outras formações sedimentares - denominada de camada estéril - que recobrem as camadas de carvão. As camadas de solo superficial são removidas no estágio inicial de lavra, possibilitando a descobertura de carvão, que será lavrado posteriormente.

Devido à remoção de grandes quantidades de material estéril por tonelada de carvão extraído, este método de lavra pode causar impacto ambiental negativo, caso o planejamento e a recuperação da área degradada não seja definida e executada desde seu início (Koppe & Costa, 2002).

Como a área de mineração de carvão a céu aberto é irrestrita em comparação à mineração em subsolo, são utilizadas grandes máquinas encarregadas da escavação, transporte e carregamento de materiais estéreis. Para a escolha certa do método de mineração a ser utilizado, precisa-se considerar vários fatores, tais como o tamanho do depósito de carvão, controle estrutural de depósito, disponibilidade de equipamentos e compatibilidade com outros equipamentos ou máquinas e a vida útil do depósito, assim como a taxa de produção de carvão (Koppe & Costa, 2002).

A seleção de um método específico de lavra a céu aberto está geralmente condicionada ao sistema de remoção da cobertura, considerando que esta operação demanda os maiores investimentos e custos operacionais, sendo o objetivo principal desta escolha retirar o máximo de carvão a um custo mínimo e ao mesmo tempo reduzir o impacto ambiental promovido pela mineração (Koppe & Costa, 2002).

### 2.3 Processo de recuperação

O processo de recuperação das áreas mineradas consiste basicamente no preenchimento das cavas de mineração mediante a utilização das litologias subjacentes às camadas de carvão e do solo natural, a fim de recompor-se topograficamente a paisagem e proporcionar-se ao solo condições para recuperar sua capacidade produtiva original.

A recomposição topográfica da paisagem é feita através da distribuição dos materiais estéreis extraídos no início da lavra, utilizando-se para isso tratores de esteiras que vão preenchendo as cavas mineradas e nivelando o terreno até atingir as cotas pré-estabelecidas. Em geral estes materiais são uma mistura heterogênea com litologias e graus de intemperização variados, e podem adicionalmente ser caracterizados por espessuras e colorações variadas. O processo de reposição da paisagem deve ser feito concomitantemente com a lavra em forma seqüencial, evitando assim a exposição prolongada dos materiais estéreis extraídos às condições ambientais. Ou seja, à medida que uma cava vai sendo aberta, o material extraído é utilizado para o preenchimento de outras.

Idealmente, a reposição dos materiais utilizados na construção deverá ser feita na seqüência original (Kämpf et al, 2000), deixando o solo natural, constituído pelo horizonte A, espalhado superficialmente na área reconstituída topograficamente.

Após a finalização da recomposição da paisagem, implementam-se práticas conservacionistas tais como o terraceamento, o preparo do solo e a correção da fertilidade do solo, seguida da implantação de gramíneas e espécies arbóreas, visando não somente a recuperação paisagística, mas também o controle dos processos erosivos e a recuperação das propriedades físicas do solo (Bugin, 2002).

O sucesso do estabelecimento, crescimento e manutenção da vegetação depende diretamente das limitações físicas e químicas que apresentam os solos após sua construção. A construção deve garantir a devolução de terras mineradas ou perturbadas num estado produtivo igual ao original, onde se sustente o desenvolvimento da flora e da fauna (Snarski et al., 1981; Bussler et al., 1984).

A mineração de carvão a céu aberto e a reconstituição das áreas mineradas originam, portanto, áreas recuperadas topograficamente, compostas por camadas superficiais constituídas pelo solo natural, onde os horizontes do mesmo freqüentemente encontram-se misturados, assim como por camadas sub-superficiais compostas pelos materiais estéreis de mineração removidos durante o processo de lavra.

#### **2.4 O processo de sulfurização**

Os materiais estéreis utilizados na construção de áreas mineradas são ricos em sulfetos, principalmente a pirita. Quando expostos a condições de oxidação, a pirita oxida-se formando ácido sulfúrico, caracterizando assim o principal processo pedogenético ocorrente nestas áreas, denominado de sulfurização.

Segundo Sencindiver & Ammons (2000), alterações nas diversas camadas dos solos construídos são relacionadas ao processo de sulfurização, sendo os minerais originais do solo intemperizados pelo ácido sulfúrico produzido, formando novas fases minerais pelos processos de dissolução (Fanning & Burch, 2000).

Segundo Fanning & Fanning (1989), são reconhecidos três estágios do processo de sulfurização:

- (1) *Pré-sulfurização*: estágio onde a oxidação dos materiais sulfetos está inibida pelo ambiente redutor, por exemplo, em um ambiente com saturação contínua de água. O pH pode ser neutro ou alcalino. São os solos sulfatados potencialmente ácidos.
- (2) *Sulfurização ativa*: estágio onde os materiais sulfetos são oxidados e minerais estão sendo decompostos pelo ácido sulfúrico, formando-se novas fases minerais, produtos da reação. Na ausência de carbonatos, o pH pode ser inferior a 3,5, com formação de jarosita (sulfato de Fe e K).
- (3) *Pós-sulfurização*: estágio em que os sulfetos estão completamente oxidados. O pH é normalmente maior que 4; a presença de jarosita ou outros sulfatos e cores com cromas altos (óxidos de Fe) evidenciam que o material sofreu sulfurização.

A intemperização por sulfurização produz um pH extremamente baixo, mosqueados de jarosita amarela e liberação de íons sulfato e cátions como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ . Estes íons podem ser acumulados por complexação e depois serem lixiviados. Os solos construídos, nas condições ambientais normais, passam a ter uma evolução pedogénica (Kämpf et al., 1997), desenvolvendo horizontes sulfúricos (Sencindiver & Ammons, 2000).

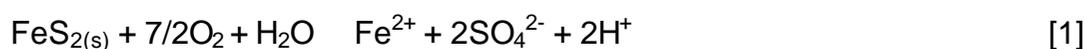
## 2.5 Oxidação da pirita

Quando materiais contendo sulfetos são expostos a condições oxidantes pelo processo de mineração de carvão a céu aberto, a ocorrência espontânea de uma série de reações de intemperismo químico é favorecida.

Este tipo de intemperismo é análogo ao intemperismo geológico que atua por extensos períodos de tempo (centenas a milhares de anos). Entretanto, pelo fato de ser muito mais rápido (dias, meses ou anos), pode liberar quantidades prejudiciais de  $\text{H}^+$ , metais e outros componentes solúveis no ambiente terrestre e aquático (Pinto & Kämpf, 2002).

A oxidação da pirita depende de vários fatores, tais como a área superficial reativa da pirita, a concentração de  $\text{Fe}^{2+}$ , a concentração de  $\text{O}_2$ , o pH da solução, as formas da pirita e a presença de bactérias (Skousen et al., 2000).

Nas Equações [1], [2], [3], [4] e [5], a oxidação da pirita caracteriza-se pela presença do  $\text{O}_2$ , que inicia este processo com a liberação de  $\text{Fe}^{2+}$ , produção de acidez ( $\text{H}^+$ ) e  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ao mesmo tempo, o  $\text{Fe}^{2+}$  é oxidado para  $\text{Fe}^{3+}$ , produzindo um mol adicional de acidez ( $\text{H}^+$ ) (Geidel & Caruccio, 2000).



Em condições naturais, o processo de oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  lentamente decresce o pH. Com este baixo pH (aproximadamente 2,3), a solubilidade do  $\text{Fe}^{3+}$

aumenta, podendo o  $\text{Fe}^{3+}$  oxidar a pirita diretamente, acelerando a reação e liberando grandes quantidades de  $\text{H}^+$ , que geram acidez.

A estequiometria da Equação [1] mostra que 1 mol de  $\text{FeS}_2$  pode produzir 2 moles de  $\text{H}^+$  (acidez). Por outro lado, o  $\text{Fe}^{2+}$  produzido pode oxidar-se para  $\text{Fe}^{3+}$  pela reação da Equação [2], produzindo um total adicional de 2 moles de  $\text{H}^+$  (Equação [3]). O S da pirita também pode oxidar-se por excesso de  $\text{Fe}^{3+}$  em solução, promovendo a hidrolização e liberação de 16 moles de  $\text{H}^+$  (Equação [4]).

Tanto a reação da oxidação direta da pirita pelo oxigênio, assim como do  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  são muito lentas, a primeira inclusive independentemente do pH (Equação [1]), ao contrário da oxidação pelo  $\text{Fe}^{3+}$  (Equação [4]) que só é possível a pH inferior a 4.

As duas bactérias que catalisam a reação da Equação [2], foram isoladas das drenagens ácidas de minas e identificadas como *Thiobacillus thiooxidans*, oxidadora de enxofre, e *Thiobacillus ferrooxidans*, que oxida  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ . A presença destas bactérias acelera os coeficientes de oxidação da pirita (Evangelou et al., 1985).

Quando o pH é inferior a 4, a bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* é o agente catalítico, mantendo a oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  na mesma taxa em que a pirita reduz o  $\text{Fe}^{3+}$ , formando um ciclo de propagação (Pinto & Kämpf, 2002).

Segundo Geidel & Caruccio (2000), as Equações [6], [7] e [8] sugerem a oxidação da pirita na ausência do  $\text{O}_2$  segundo duas vias. Estas reações, dependendo do potencial redox, podem produzir enxofre elementar ou sulfato, além de  $\text{H}^+$  e íons  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ .

A reação inicial ocorre na ausência de  $\text{O}_2$  e as três seguintes equações descrevem as meias reações de oxidação da pirita pelo processo eletroquímico:



Como observado na Equação [4], o  $\text{Fe}^{3+}$  pode tornar-se o principal oxidante da pirita. Deste modo, apesar de o  $\text{O}_2$  poder controlar a última reação catódica (Equação [5]), a maioria dos passos determinados podem não envolver o  $\text{O}_2$ .

Assim, conforme observado na reação molecular da Equação [1] a relação molar sulfato/acidez é 1:1, enquanto que para a reação eletroquímica da Equação [6] a relação é 1:8. Esta relação pode ser usada para identificar se a reação é molecular ou eletroquímica (Geidel & Caruccio, 2000).

Nesse sentido, a constatação da necessidade de  $O_2$  para a oxidação da pirita tem importantes implicações para as práticas de controle de drenagem ácida (Geidel & Caruccio, 2000).

Estas reações apresentadas, tanto como fenômeno molecular como eletroquímica, produzem grandes quantidades de íons  $H^+$ , promovendo a acidificação dos solos construídos.

## 2.6 Drenagem ácida de mina

A drenagem ácida de mina (DAM) forma-se quando minerais sulfetos são expostos a condições oxidantes como ocorre em minas, construções de estradas e outras escavações de grande escala (Skousen et al., 2000).

O grau de acidificação gerada na reação de oxidação de sulfetos depende da natureza do metal associado. Assim, há indicações de que a presença de Fe em sulfetos, como pirita, marcassita, pirrotita, arsenopirita e calcopirita, é condição essencial para a geração de soluções ácidas (Mello et al, 2003). Existem diferentes tipos de minerais sulfetos, destacando-se em regiões de carvão predominantemente a pirita e marcassita ( $FeS_2$ ).

Na mineração de carvão, a oxidação da pirita ( $FeS_2$ ) pode ocorrer nos solos construídos, nas pilhas de rejeitos, nas cavas abertas para extração e no processo de beneficiamento do carvão, favorecendo a liberação de acidez para as águas de drenagem (Singer & Stumm, 1970).

A qualidade da DAM gerada pelos minérios depende da produção ácida (sulfetos) ou alcalina (carbonatos) dos minerais contidos na rocha alterada. Geralmente materiais enriquecidos com sulfetos e pobres em carbonatos produzem drenagens ácidas. A DAM está compreendida por metais (Fe, Al, Mn, dependendo do sulfeto presente) e pela acidez por  $H^+$ . Outros fatores como as variações na mineralogia e o tamanho de partículas alteram significativamente a qualidade da drenagem das águas. Partículas mais grosseiras facilitam a

circulação do ar, enquanto partículas finas expõem maior área superficial específica para a oxidação (EUA, 1994).

Como foi observado nas Equações [1], [4], [6] e [8] da oxidação da pirita, o processo de acidificação ocorre por várias reações. Se quaisquer destes processos fossem diminuídos ou refreados, também a geração de DAM seria diminuída ou detida. Eliminando o ar e/ou a água do sistema, duas das três principais reações podem deixar de oxidar a pirita. Isto acontece naturalmente quando a intemperização da pirita ocorre em condições de saturação de água. Nesse caso, pequenas quantidades de pirita são oxidadas gerando pouca acidez, como ocorreria em ambientes não alterados. Esta escassa produção de acidez é naturalmente diluída ou neutralizada por rochas básicas que se encontram no solo.

Outra maneira de controlar a acidificação destas áreas é através da predição e prevenção da geração de acidez, utilizada normalmente no planejamento pré-mineração. Os dois principais objetivos da predição da acidez são: (1) determinar se o material vai gerar acidez e (2) predizer a qualidade da drenagem ácida com base na taxa de formação de ácido (EUA, 1994).

Existem vários métodos para prever a geração de acidez. Estes métodos são classificados em estáticos e cinéticos (EUA, 1994). Os testes estáticos estimam o total de acidez e de alcalinidade presentes nas amostras, enquanto os testes cinéticos procuram predizer a qualidade da drenagem com base na taxa de formação de ácido.

Os testes estáticos determinam o potencial de acidificação (PA) (baseado no conteúdo total de pirita) e o potencial de neutralização (PN) (conteúdo de carbonatos). A diferença entre ambos potenciais determina se a quantidade de carbonatos presentes no material tem a capacidade de neutralizar a acidez produzida e, assim, avaliar se a drenagem produzida será ácida, neutra ou alcalina, dependendo, entre outros fatores, do tipo de silicato, do pH e da área superficial específica (Pinto, 1997).

Apesar de ocorrerem muitos tipos de compostos alcalinos em rochas, apenas carbonatos e argilominerais ocorrem em quantidades suficientes para neutralizar efetivamente a drenagem ácida (Skousen et al., 2000).

Na literatura encontram-se vários métodos de análises de enxofre, como os desenvolvidos por Johnson & Nishita (1952), Beaton et al. (1968),

Aspiras et al. (1972), Sobek et al. (1978), Sorensen et al. (1979), Caruccio et al. (1981), Coastech (1989), citados por EUA (1994) e Corrêa et al. (2002). O método analítico que tem recebido maior destaque foi proposto por O'Shay et al. (1990), que utiliza  $H_2O_2$  como agente oxidante e determina a acidez gerada por titulação com uma base forte (Pinto, 1997; Corrêa et al., 2002).

O'Shay et al. (1990) realizaram um estudo comparativo entre vários métodos de estimativa do potencial de acidificação e comprovaram que os outros métodos estimam um potencial de acidificação muito mais elevado que o método do peróxido de hidrogênio.

Segundo EUA (1994), para a predição da geração de acidez utiliza-se o potencial líquido de neutralização ("*Net Neutralization Potencial*") ou *NNP* que é calculado pela diferença entre PN e PA ou pela razão PN/PA. Amostras com diferenças de *NNP* < 0 ou razões PN/PA < 1 serão geradoras de ácido; amostras com *NNP* entre -20 e 20 ou razões entre 1:1 e 3:1 caem em uma zona de incerteza (EUA, 1994). Segundo Pinto (1997), outro critério bastante adotado para a predição da geração da acidez é razão PN/PA > 2,5 - 3,0 determinada para amostras não geradoras de acidez.

Existem vários fatores que controlam a produção ou geração de DAM, identificados e classificados como primários, secundários e terciários (EUA, 1994).

### **Fatores primários**

Os fatores primários envolvem a produção de acidez pelas reações de oxidação. Estes fatores são:

a) Tipo de sulfeto: alguns sulfetos são oxidados mais rapidamente (marcasita e pirrotita) que outros e minerais com maiores áreas superficiais específicas, evidenciadas pela presença de microcristais (pirita framboidal), oxidam-se também rapidamente (Arora et al., 1978; Mermut et al., 1985).

b) Água: serve tanto como reagente, como meio de desenvolvimento de bactérias no processo de oxidação, assim como também para o transporte dos produtos da oxidação (EUA, 1994).

c) Oxigênio: o oxigênio é particularmente importante para manter a rápida oxidação catalisada por bactérias a valores de pH abaixo de 3,5. A

oxidação é consideravelmente reduzida quando a concentração de oxigênio é menor do que 1% a 2% (EUA, 1994; Soares et al., 2002).

d) Bactérias: existem bactérias melhores adaptadas a diferentes níveis de pH e outros fatores edáficos (características químicas e físicas do solo e o ambiente da água). O tipo de bactéria e o tamanho da sua população mudam dependendo da otimização das condições proporcionadas para seu desenvolvimento. Entre pH 3,5 e 4,5, a oxidação do ferro é preferencialmente catalisada pela variedade *Metallogenium*, ao passo que a  $\text{pH} < 3,5$  é catalisada pelo *Thiobacillus ferrooxidans* (Evangelou et al., 1985; EUA, 1994; Skousen et al., 2000).

e) Calor de reação: a oxidação é exotérmica, com potencial de gerar grandes quantidades de calor e gradientes termais. O calor produzido é dissipado por condução ou convecção (EUA, 1994). O fluxo convectivo do ar pode ocorrer devido à alta porosidade no material, disponibilizando  $\text{O}_2$  para as reações (Guo et al., 1994).

### **Fatores secundários**

São aqueles que atuam neutralizando a acidez produzida pela oxidação de sulfetos, mudando a composição do efluente pela entrada de metais mobilizados pela ação ácida (dissolução). Os produtos da oxidação trocam ou adsorvem íons com as partículas de argilas e precipitam minerais (EUA, 1994).

### **Fatores terciários**

Os fatores terciários referem-se aos aspectos físicos do meio que influenciam a reação de oxidação, migração e consumo do ácido, sendo:

a) Natureza física dos materiais: tamanho de partículas, permeabilidade, etc.; partículas mais grosseiras expõem menor área superficial, mas podem permitir o maior fluxo de ar e água a profundidade, expondo maior quantidade de material à oxidação e gerando mais acidez. Por outro lado, partículas mais finas expõem maior área superficial, porém, limitando o fluxo de água e ar. A relação entre tamanho de partículas, área superficial e oxidação cumpre um importante papel nos métodos da predição de acidez. Como o

material intemperiza com o tempo, o tamanho de partículas é reduzido, expondo maior área superficial e mudando as características físicas da unidade (EUA, 1994).

b) Hidrologia: quando existem materiais com potencial de geração de acidez abaixo do lençol freático, a lenta difusão do oxigênio na água retarda a produção da acidez. Nas paredes das minas, o fluxo de água e ar em juntas e fraturas pode ser uma fonte de ácido; os ciclos de secamento e umedecimento tendem a acumular produtos de oxidação nos ciclos secos e a liberar contaminantes nos eventos de maior precipitação (EUA, 1994).

c) Distribuição espacial: disposição de materiais geradores de acidez e de materiais alcalinos (EUA, 1994).

## **2.7 Transformações decorrentes da acidificação**

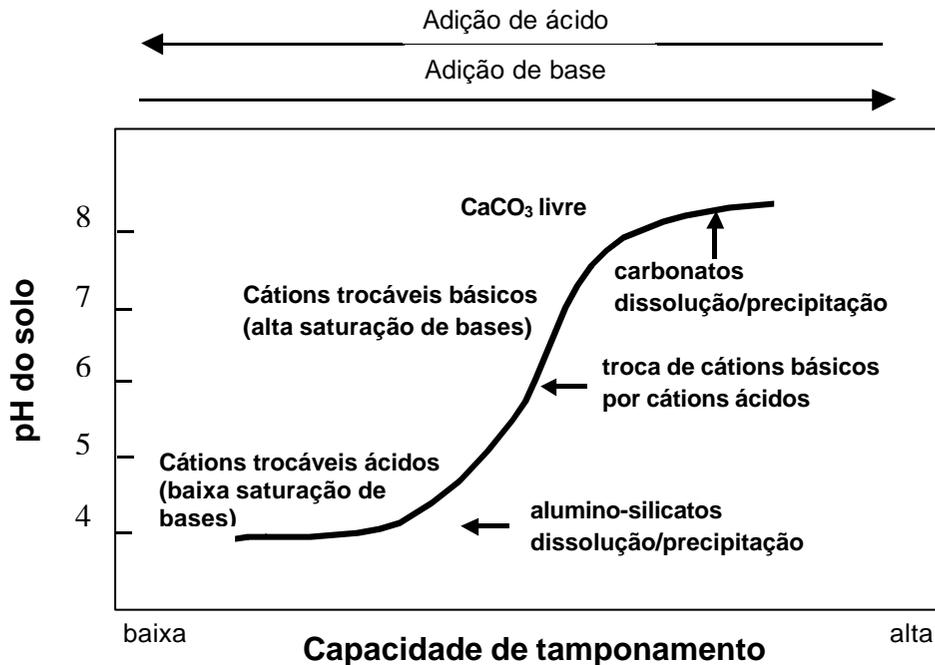
Altos níveis de acidez ( $\text{pH} < 3,5$ ) são produzidos pela exposição da pirita a condições ambientais favoráveis para sua oxidação, causando deficiência de nutrientes e concentrações tóxicas de alguns elementos na solução do solo, o que inibe o desenvolvimento de plantas. Isto favorece o escasso desenvolvimento da cobertura vegetal, permitindo a erosão superficial do solo e o assoreamento de cursos hídricos próximos.

A grande quantidade de íons  $\text{H}^+$  produzidos desloca os cátions básicos do complexo de troca dos argilominerais, resultando na lixiviação dos mesmos e na diminuição da saturação por bases e do pH. Uma vez que o solo construído atinge valores de pH extremamente baixos, os íons  $\text{H}^+$ , por reação de hidrólise, passam a afetar a estabilidade dos silicatos, com a conseqüente dissolução destes e liberação de cátions estruturais, especialmente Al, Fe e Mg (Pinto, 1997; Pinto & Kämpf, 2002).

Esta dissolução dos silicatos representa a sua ação de tamponamento em pH ácido, ao contrário dos carbonatos que tamponam o pH alcalino (Figura 1). Desta forma, com a oxidação dos sulfetos e a dissolução de alumino-silicatos, há um aumento na solubilidade da maioria dos metais, gerando grandes quantidades de Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu e outros.

A oxidação da pirita e a dissolução dos alumino-silicatos geram condições para a neogênese de minerais. A partir do Fe e S liberados da pirita,

são formados óxidos (goethita e ferrihidrita) e sulfatos de  $\text{Fe}^{2+}$  (melanterita, rozenita, szomolnokita e capiatita). Com Si, Al e K podem ser formados sílica amorfa, hidróxidos de Al (gibbsita), sulfatos de Al (jurbanita, aluminita e basaluminita) e sulfato de  $\text{Fe}^{3+}$  e K (jarosita) (Kämpf et al., 1997; Almeida, 1999; Pinto & Kämpf, 2002).



**FIGURA 1.** Relação entre o pH do solo e a quantidade de cátions trocáveis básicos e ácidos (Pinto & Kämpf, 2002).

Os minerais neoformados atuam como controladores da concentração de vários elementos na solução do solo. A goethita e a jarosita são provavelmente aqueles que adsorvem a maioria dos elementos traços, seja na forma adsorvida ou como co-precipitados (Pinto & Kämpf, 2002).

## 2.8 Meio ambiente e mineração

Tanto a mineração de carvão a céu aberto como em subsolo podem causar danos irreversíveis ao ecossistema. As alterações físicas e químicas decorrentes dos processos de lavra e construção variam em intensidade segundo as características do local, da qualidade do carvão, do método de lavra executado, do tipo de máquinas utilizadas e do conhecimento ou preparação dos operários que fazem o trabalho. A desconsideração de alguns destes fatores na reposição da paisagem, pode levar ao fracasso da restauração destas áreas,

devido aos altos custos de manutenção a longo prazo, ocasionados pela falta de planejamento pré-mineração (Terrence & Black, 2000).

A mineração de carvão constitui uma situação de risco de contaminação, seja durante os procedimentos de lavra, beneficiamento, disposição de solos e rejeitos ou nas atividades industriais que utilizam o carvão e seus subprodutos como insumos para a produção de bens.

Uma das formas de expor os materiais contendo sulfeto às condições oxidantes é através da reposição da paisagem, onde o material que está sendo decapado da frente de mineração é invertido, alterando-se sua posição original. Deste modo, os materiais enriquecidos em pirita ( $\text{FeS}_2$ ), situados originalmente em grandes profundidades, permanecem próximos à superfície sendo cobertos por uma fina camada de solo.

Estas camadas de solo freqüentemente apresentam-se desestruturadas, com alta densidade, baixa porosidade, problemas de infiltração, baixa condutividade hidráulica, baixa disponibilidade e redistribuição de água, facilitando a perda das mesmas por erosão e impossibilitando uma cobertura vegetal apropriada (Mc Sweeney & Jansen, 1984; Potter et al., 1988; Andrews et al., 1998; Nunes, 2002).

A perda destas camadas de solo, justamente pela falta de cobertura vegetal, e as más condições físicas originam uma segunda possibilidade de exposição dos materiais sulfetos. Quando as camadas subsuperficiais encontradas imediatamente após a camada de solo são expostas às condições ambientais (água e ar), estas promovem a formação de drenagem ácida, o que favorece a poluição de cursos hídricos e o desencadeamento de reações de acidificação, inibindo seriamente a revegetação das áreas construídas pela deficiência de nutrientes para as plantas e concentrações tóxicas de metais, tornando-se fontes pontuais de poluição (Pinto & Kämpf, 2002).

A drenagem ácida é responsável pela poluição hídrica, devido às alterações do pH das águas e à conseqüente liberação de substâncias e elementos-traço, muitas vezes de elevado potencial de toxicidade (Ortíz & Teixeira, 2002).

A mineração de carvão, além de promover a exposição de grandes áreas devido aos processos de lavra a céu aberto, gera uma quantidade enorme de rejeitos depositados em pilhas ou barragens próximos às áreas mineradas.

Estes depósitos, ricos em sulfetos, podem tornar-se fontes geradoras de drenagem ácida com elevados níveis de metais. Desta forma, os lixiviados podem atingir rios e arroios, provocando uma ampla dispersão dos contaminantes em solução e na forma particulada (Salomons, 1995).

O planejamento e controle adequados dos processos envolvidos na mineração de carvão são fundamentais para evitar-se problemas de desrespeito à legislação e conseqüente poluição ambiental.

## **2.9 Legislação ambiental**

O homem vem desenvolvendo atividades econômicas, acelerando irreversivelmente o processo de transformação dos recursos naturais em bens ou utilidades, extinguindo-os ou degradando-os, em menor tempo e com mais eficiência, tendo como conseqüência alterações no ecossistema que podem ameaçar a própria existência da vida.

Nas décadas de 70 e 80 do século 20, a exploração dos recursos naturais, preocupou ecologistas e despertou o interesse de alguns legisladores, motivo pelo qual o direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado passou a ser considerado um direito fundamental. Conseqüentemente, em 1981, promulgou-se a Lei 6.938 – Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, disciplinando os problemas decorrentes da escassez e elevando o meio ambiente à categoria de bem de uso comum do povo, atribuindo-lhe função ambiental e condicionando a atividade empresarial à proteção e preservação dos recursos naturais (Teixeira, 2002).

Com o decorrer do tempo e ante as inovações estabelecidas a nível mundial em matéria de direito ambiental, a legislação ambiental no Brasil sofreu novas modificações, incorporando, em 1986, através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a resolução 001/86, regulamentada pela lei 6.938, que definiu os empreendimentos passíveis de Licenciamento Ambiental e instituiu a exigência de EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental) para novos empreendimentos, inclusive a mineração (Brasil, 1986b).

O licenciamento para este tipo de atividades foi regulamentado pelas resoluções 009/90 e 010/90 do CONAMA, estabelecendo as Normas e Procedimentos de Licenciamento Ambiental.

Conforme estabelece a Constituição Federal em seu artigo 225, promulgado em 5 de outubro de 1988, "Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei" (Lopes, 2000).

O decreto Nº 99.274, de 6 de junho de 1990, regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente.

O Art. 2º deste decreto define como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais, enquanto o Art. 3º estabelece a finalidade dos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD: “A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente”.

Em decorrência destes dispositivos legais, o exercício da atividade mineradora está condicionado a três instrumentos específicos de controle do Poder Público no que tange aos riscos potenciais de danos ao meio ambiente resultantes da lavra: o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA), o Licenciamento Ambiental (LA) e o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) (Lopes, 2000).

Tendo em vista os possíveis danos ambientais ocasionados pela mineração de carvão e as restrições legais para a proteção do meio ambiente, é indispensável conhecer as propriedades químicas dos materiais que irão constituir os solos construídos. Igualmente, a pesquisa dos processos químicos e físicos que acontecem nestes solos, resultantes da sulfurização e das modificações estruturais dos materiais estéreis durante a mineração, fornecerá subsídios para o adequado planejamento da atividade mineradora, a recuperação das áreas exploradas e o controle ambiental.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi realizado na mina de carvão Boa Vista, localizada nos Municípios de Minas do Leão e Butiá, na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. Esta mina, pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), extrai carvão mineral a céu aberto, que é transportado para a planta de beneficiamento Minas do Leão I, localizada a 5 km do local de exploração.

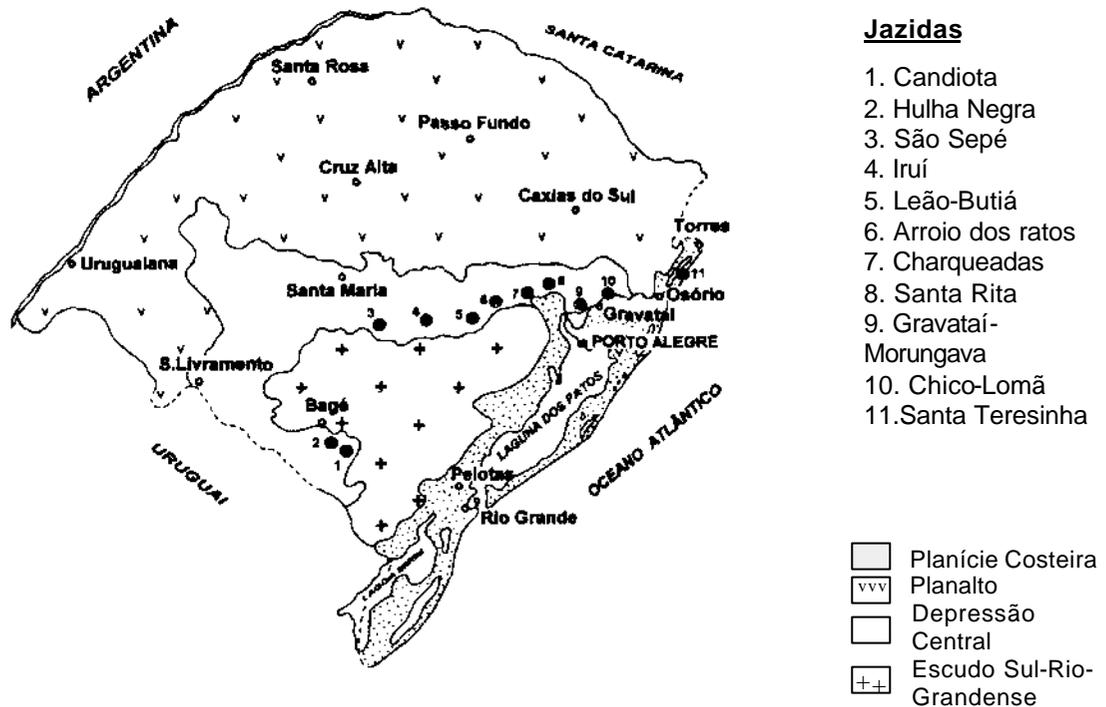
Após encerrada a exploração do carvão em cada cava de mineração, as áreas mineradas são recuperadas pela reposição da paisagem, utilizando-se para isso os materiais estéreis ou rejeitos e o solo natural. Uma vez reposta a paisagem, procede-se à implantação da vegetação de cobertura, tentando-se evitar a erosão superficial e posterior exposição dos materiais estéreis, localizados nas camadas subjacentes, a condições ambientais oxidantes.

Este estudo selecionou diferentes áreas onde ocorre a construção dos solos e da paisagem e caracterizou-as pelo estudo morfológico, químico e físico dos perfis de solos e seus horizontes ou camadas.

#### **3.1 Características da área de estudo e dos processos de mineração e construção**

##### **3.1.1 Aspectos geológicos e pedológicos da bacia carbonífera Leão-Butiá**

No Rio Grande do Sul, as jazidas de carvão encontram-se ao longo das bordas sudoeste, norte e nordeste do Escudo Sul-Riograndense (Figura 2). As camadas de carvão fazem parte da Formação Rio Bonito, do Grupo Guatá, do Supergrupo Tubarão e do Permiano Superior (Brasil, 1986).



**FIGURA 2.** - Situação das principais jazidas de carvão no RS (Pinto, 1997).

Na época da deposição da Formação Rio Bonito, as superfícies irregulares do embasamento e/ou Grupo Itararé formaram vários ambientes deposicionais, originando variações na litologia e espessura de formação, até mesmo, sua ausência nos paleoaltos. Em função disso, do oeste para leste do Estado, observa-se uma gradação nos pacotes portadores das camadas de carvão, de rochas síltico-arenosas (Candiota) para pelíticas (síltico-argilosas) (Leão-Butiá), representando diferentes condições paleoambientais (Pinto, 1997).

De acordo com o Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul (Brasil, 1973), os solos ocorrentes, na área onde a mina de carvão Boa Vista está localizada, pertencem à unidade de mapeamento Alto das Canas, classificados como Argissolo Vermelho Distrófico latossólico (Embrapa, 1999; Streck et al., 2002). Esta unidade de mapeamento apresenta algumas variações, influenciadas principalmente por condições de umidade, ocorrendo perfis com cores mais acinzentadas e amareladas e alguns perfis com textura superficial mais leve, constituindo uma transição para os solos da unidade de mapeamento Rio Pardo.

Além das variações apresentadas, existem inclusões de outras unidades de mapeamento, consistindo em 5% da área composta por solos da unidade São Gabriel (Planossolo Háptico eutrófico típico) e outros 5% da área por solos das unidades Rio Pardo (Argissolo Vermelho distrófico latossólico) e Cerrito (Latosolo Vermelho distrófico argissólico). Em algumas áreas, são encontradas pequenas incidências de solos hidromórficos (Brasil, 1973).

Os solos da unidade de mapeamento Altos das Canas ocupam relevo ondulado, formado por um conjunto de elevações arredondadas (coxilhas), com pendentes em centenas de metros e declives médios em torno de 8%, situam-se a uma altitude que varia de 100 a 800 metros (Brasil, 1973).

### **3.1.2 Clima e vegetação da bacia carbonífera Leão-Butiá**

O clima dominante na região é do tipo Cfa de Koeppen, classificando como subtropical úmido (Pinto, 1997; Companhia Riograndense de Mineração - CRM, 2000a).

A temperatura média anual é de 19°C, sendo que no mês de janeiro é de 25°C e em julho é de 13°C. A média das máximas no mês mais quente é de 31°C e das mínimas no mês mais frio é de 8°C (Brasil, 1986a).

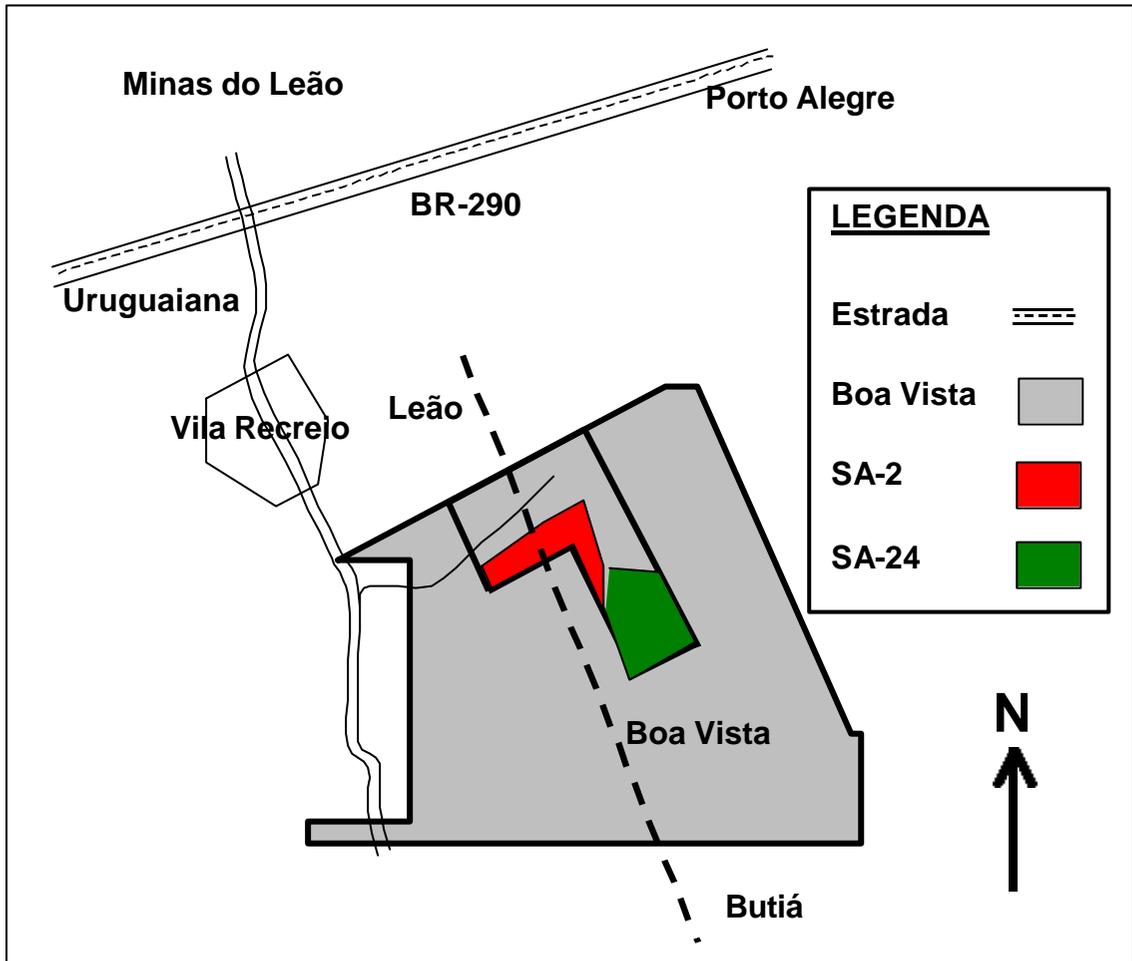
A precipitação total média anual é de 1300 mm, sendo os meses mais chuvosos junho, agosto e setembro e os menos chuvosos abril, maio e novembro. O balanço hídrico mostra um excedente médio anual entre 200 e 300 mm entre junho e outubro e deficiência hídrica de 100 mm entre dezembro e fevereiro (Brasil, 1986a).

A cobertura vegetal é de pequeno a médio porte e representada pelas várias espécies de gramíneas, matas ciliares acompanhando os cursos hídricos e, geralmente, em porções topográficas mais elevadas, capões isolados (CRM, 2000a).

### **3.1.3 Mina de carvão Boa Vista**

A mina de carvão Boa Vista está situada na localidade do mesmo nome, pertencente parte ao Município de Minas do Leão e parte ao Município de Butiá, no Estado do Rio Grande do Sul. O acesso à área é feito pela Rodovia

Federal BR-290, que une Porto Alegre a Uruguaiiana, no km 85, distante 2 km da rodovia atravessando o Arroio Taquara (Figura 3).



**FIGURA 3.** Localização e vias de acesso à mina de carvão Boa Vista, (CRM 2000a). (SA-2: sub-área de solo construído de 2 anos; SA-24: sub-área de solo construído de 24 anos).

A mina de carvão Boa Vista é muito antiga, dando-se início aos primeiros trabalhos de mineração em subsolo em 1946 por proprietários particulares (CRM, 2000a).

Os trabalhos de mineração continuaram até 1959, passando por várias trocas de proprietários, quando a extração de carvão do subsolo parou devido a grande espessura da cobertura estéril sobre o carvão. Mais tarde, em 1977, iniciou-se novamente a exploração do carvão pela CRM, que durou até 1981, quando os trabalhos pararam novamente pela inviabilidade econômica da exploração, afetada pelos preços do mercado.

Por último, em 1995, foi protocolizado um novo pedido de pesquisa pela empresa CRM, iniciando a exploração em janeiro de 2000, que continua até hoje (CRM, 2000a).

A mina de carvão Boa Vista possui uma área total de 7,6 ha, tendo uma vida útil estimada entre 5,3 anos e 2,6 anos, dependendo do ritmo de mineração. A reserva total de carvão é de 644.000 toneladas, resultando numa relação estéril/minério de 2,77 m<sup>3</sup>/t (CRM, 2000b).

A ocorrência do carvão na área exibe continuidade em relação à Jazida do Leão-Butiá, sendo identificadas várias camadas carbonosas (CRM, 2000b).

A distribuição destas camadas é apresentada na Figura 4 e suas características brevemente descritas a seguir:

Camada Superior 2 (S2): é caracteristicamente posicionada no terço superior da Formação Rio Bonito, definindo um pacote com duas camadas (S3 e I). Atinge espessuras entre 0,9 e 2,1 m.

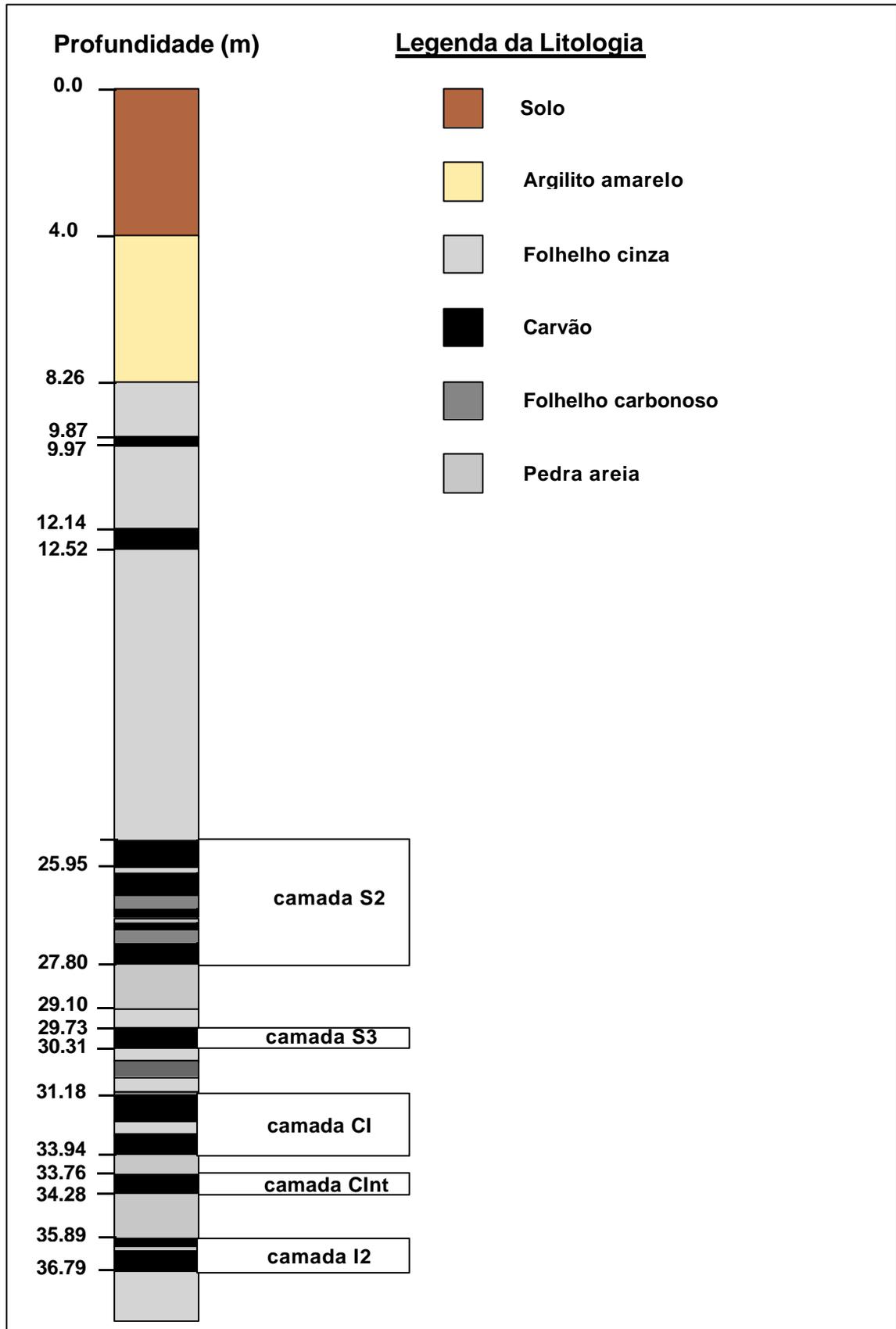
Camada Superior 3 (S3): assume uma posição intermediária e transicional entre as camadas S2 e I, sendo constituída por níveis carbonosos que podem ser confundidos ora com a camada sobreposta ora com a sotoposta.

Camada Inferior (CI): define-se pela ocorrência de leitos de carvão de distribuição lateral mais constante, fator este que condiciona a tomá-la como camada preferencial à lavra. O pacote definido pelas camadas acima está imediatamente sobreposto ao primeiro banco de Pedra de Areia dentro da Formação Rio Bonito.

Camada intermediária (CIInt): acha-se confinada entre dois bancos de Pedra de Areia, posição esta que lhe confere o nome de camada intermediária. É a camada de distribuição lateral menos constante e a de menor espessura, alcançando no máximo 1 m.

Camada Inferior 2 (I2): é a mais profunda das camadas mineráveis na área, situando-se imediatamente abaixo do segundo banco de Pedra de Areia. Atinge entre 0,5 e 1,23 m de espessura.

Quanto ao solo natural encontrado dentro da área de estudo, este constitui uma variação da unidade de mapeamento Alto das Canas, classificado como Plintossolo Argilúvico (EMBRAPA, 1999).



**FIGURA 4.** Perfil simplificado da coluna geológica da mina de carvão Boa Vista (adaptado de CRM, 2000b).

Os Plintossolos, geralmente, são solos de drenagem moderada a imperfeita, apresentando seqüência de horizontes A-Bf-C, quando o horizonte B é plíntico, identificado pela coloração variegada ou mosqueado característico da plintita. Esta coloração reflete a condição de drenagem moderada ou imperfeita destes solos.

Quanto a sua aptidão ao uso agrícola, a drenagem moderada a imperfeita são limitações para uma série de espécies cultivadas anuais e perenes. Além disso, estes solos são normalmente ácidos e com baixa saturação por bases, necessitando aplicação de corretivos e adubos (Streck et al., 2002).

### 3.1.3.1 Características do processo de lavra e reposição

A mineração na mina de carvão Boa Vista é realizada pelo método de extração a céu aberto dada a viabilidade econômica da execução deste método. Primeiramente é feita a retirada de todo o solo natural, cuidando sempre de não misturar com outros materiais, utilizando-se uma retroescavadeira de médio porte. O solo extraído é transportado por caminhões convencionais tracionados de 14 a 15 m<sup>3</sup> de caçamba até o local de armazenamento, onde será mantido para uso posterior na recuperação das áreas mineradas.

Posteriormente, o material estéril é extraído até atingir as camadas de carvão. Muitas vezes os estratos de folhelhos bem consolidados, assim como as camadas de pedra de areia, necessitam ser detonados para sua remoção, utilizando-se para isso carreta de perfuração "*Worthington*" e compressor "*Blue Brut*" de 750 cfm com broca com botões de 2½. Quando não é necessária a detonação, as camadas são extraídas diretamente pela retroescavadeira (CRM, 2000b). O material estéril retirado para a exposição do carvão também é armazenado em áreas adjacentes para posterior utilização na reconstrução da paisagem.

Na reconstrução dos solos e da paisagem, este material estéril é utilizado para preencher as cavas de mineração, espalhando-se com tratores de esteira em camadas. Mais próximo da superfície, estes materiais são dispostos procurando-se evitar a mistura de materiais diferenciados e tentando-se reproduzir a topografia preexistente. Entre os materiais diferenciados encontram-se argilitos, folhelhos, carvão e rochas existentes nas camadas sobrejacentes ao

carvão extraído. Após se espalhar os estéreis, a área é coberta ou selada com o solo natural que já fora removido e separado no início do processo.

Portanto, este método de lavra e composição origina áreas recuperadas topograficamente, compostas superficialmente pela mistura do horizonte A, B e C do solo natural e, subsuperficialmente, composta por estéreis de mineração colocados em camadas diferenciadas, mas homogêneas internamente, com litologias e graus de intemperização variados (Nunes, 2002).

Após a realização da recomposição topográfica, o solo é preparado mediante gradagens, enquanto que concomitantemente é feita análise de solo para determinar, principalmente, o pH do solo e a necessidade de calagem.

Para a correção do pH do solo são aplicadas entre 15 a 20 t ha<sup>-1</sup> de calcário. Subseqüentemente, é implantada a vegetação de cobertura vegetal, utilizando-se várias espécies de gramíneas como a *Bracchiaria humidícola*, *Bracchiaria brizanta*, *Bracchiaria dyctomeura*, *Panicum maximum*, entre outras. A introdução das gramíneas visa conferir rapidamente uma cobertura ao solo e evitar a erosão destas áreas.

Uma vez estabelecida a vegetação de cobertura, procede-se à implantação de espécies vegetais de reflorestamento. As espécies mais utilizadas são: *Acácia sp.*, *Eucaliptus sp.* e *Pinus sp.* Na mina de carvão Boa Vista, as áreas recentemente construídas (SA-2), foram reflorestadas com *Eucaliptus sp.*, já que esta espécie é menos agressiva na sua reprodução e desenvolvimento em comparação ao *Pinus sp.* Esta agressividade faz que aumente em pouco tempo a densidade da espécie *Pinus sp.* nas áreas recuperadas, ocasionando a distribuição heterogênea das mudas das gerações subseqüentes, exigindo a eliminação constante das mesmas e tornando a manutenção das áreas reflorestadas muito trabalhosa e onerosa. Segundo Aguiar (2004, informação pessoal), a CRM objetiva erradicar as espécies de *Pinus* das áreas de solos construídos na mina de carvão Boa Vista e implantar espécies menos agressivas como *Acácia sp.* e *Eucaliptus sp.*, facilitando desta maneira o manejo das áreas reflorestadas.

### 3.1.3.2 Processo de beneficiamento e queima do carvão

O carvão extraído das minas é transportado até a planta de beneficiamento da Mina do Leão I, distante 5 km, pelos mesmos caminhões utilizados durante a extração. O processo de beneficiamento do carvão compõe-se basicamente das operações unitárias de peneiramento/britagem, estocagem e lavagem do carvão através de jigagem (fração graúda).

No jigue são obtidos, simultaneamente, dois produtos: o rejeito, com teor de cinzas superior a 75%, e o carvão CE 4200, com 42% de cinzas e poder calorífico superior de 4200 kcal kg<sup>-1</sup> (CRM, 2000b).

Posteriormente, o carvão é levado para a Usina Termelétrica de São Jerônimo (São Jerônimo, RS) para a produção convencional de energia, ou seja, queimando-se o carvão nas caldeiras, produzindo vapor que é conduzido até turbinas acopladas a geradores, transformando a energia térmica em energia elétrica (CRM, 2000b).

## 3.2 Seleção das áreas de estudo

A partir do mês de setembro de 2002 foram realizadas várias visitas à mina de carvão Boa Vista.

Após o reconhecimento e a sondagem das distintas sub-áreas, foram identificadas e selecionadas três sub-áreas para o desenvolvimento do nosso trabalho:

a) A primeira sub-área, constituída pela coluna geológica e pelo solo natural, apresentando vegetação nativa.

b) A segunda sub-área denominada SA-24 é constituída por um solo construído de 24 anos, reflorestada com dois tipos de espécies (*Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*) e apresentando diversas gramíneas rasteiras como cobertura vegetal.

c) A terceira sub-área denominada SA-2 é constituída por um solo construído há dois anos, apresentando como vegetação de cobertura *Eucalyptus sp.* e gramíneas rasteiras, ambas caracterizadas por pobre desenvolvimento.

As sub-áreas de solos construídos (SA-2 e SA-24) foram caracterizadas utilizando-se como critério o relevo para o caso da sub-área mais nova (SA-2) e a vegetação no caso da sub-área mais antiga (SA-24). Nesta

última, foram descritos quatro perfis que serão identificados da seguinte maneira: o primeiro num reflorestamento de Eucaliptus (P1-24), o segundo e o quarto num reflorestamento de Pinus (P3-24 e P4-24) e o terceiro numa capoeira de alto índice de erosão (P2-24). Na sub-área mais nova (SA-2) foram descritos três perfis que serão identificados da seguinte maneira: o primeiro localizado no relevo mais plano na parte superior da toposeqüência (P3-2), o segundo num declive de 4% na parte média da toposeqüência (P2-2) e o terceiro num declive de 8% na parte baixa da toposeqüência (P1-2).

### **3.3 Seleção dos perfis para amostragem e descrição morfológica**

Em cada uma das sub-áreas identificadas foram selecionados para amostragem e descrição diversos perfis de solo. As descrições morfológicas foram feitas segundo Lemos & Santos (1996). Após a separação e nomeação de horizontes e camadas, as principais características do solo descritas foram: espessura, profundidade, transição entre camadas, cor, textura, estrutura, porosidade, cerosidade e consistência.

Para a determinação dos atributos químicos e físicos, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas diversas camadas dos perfis. Para a coleta das amostras deformadas, foi utilizada uma pá-de-corte, sendo as mesmas acondicionadas em sacolas plásticas identificadas.

Na coleta das amostras indeformadas, foram utilizados cilindros metálicos de 10 cm de diâmetro e de 5 cm e 7,5 cm de altura, sendo utilizadas para a determinação da densidade do solo e da condutividade hidráulica saturada, respectivamente. Foram coletados três cilindros por camada de cada perfil, representando as repetições.

As amostras foram levadas à Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para sua preparação e análise.

Todas as amostras foram secas ao ar e moídas com moinho de martelos, fornecendo material com granulometria menor que 2 mm.

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química do Departamento de Solos, enquanto que as análises físicas foram realizadas no Laboratório de Erosão do mesmo Departamento.

### 3.4 Análises físicas

As análises físicas realizadas foram textura, densidade do solo, condutividade hidráulica saturada e infiltração.

As determinações granulométricas das amostras foram efetuadas segundo o Manual de Métodos de Análises de Solo da EMBRAPA (1997). Para tanto, foi utilizado o método do densímetro, descrito a seguir.

Foram colocados 50 g de solo em frascos “*snap cap*” e adicionados 100 mL de água destilada e 25 mL de solução de hidróxido de sódio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  que atuou como dispersante químico. As amostras foram agitadas em agitador horizontal por 1 hora e repousaram durante uma noite.

O conteúdo foi passado através de peneira de malha de 0,053 mm, onde o material mais grosseiro ficou retido e o material mais fino passou para um recipiente de sedimentação. O material retido na peneira foi lavado com água destilada e o resíduo do lavado depositado no recipiente de sedimentação até completar aproximadamente 900 mL, onde foi vertido em uma proveta de 1000 mL e completado com água destilada até atingir este volume.

A suspensão contida na proveta foi agitada durante 30 segundos com um bastão de diâmetro inferior ao da proveta, contendo numa extremidade uma base com vários orifícios.

Ao mesmo tempo, foi conduzida uma prova em branco, contendo a mesma quantidade de dispersante que as amostras, que também foi agitada por 30 segundos. Após 90 minutos de sedimentação, foi introduzido o densímetro de Bouyoucos e realizadas as leituras de densidade de cada amostra.

A areia retida na peneira de 0,053 mm foi lavada com jato de água destilada, transferida a um recipiente de alumínio e colocada em estufa a  $120^{\circ}\text{C}$  por 24 hs para eliminar a água. Após secagem, os recipientes foram pesados com aproximação de 0,05 g, obtendo-se assim a fração areia grossa + areia fina.

Os teores das frações foram calculados de acordo com as seguintes equações:

$$\text{Teor de argila} = (\text{leitura densímetro} + \text{leitura da prova em branco}) \times 20 \quad [9]$$

$$\text{Teor de areia} = \text{Pesagem da areia retida na peneira de 0,053 mm} \quad [10]$$

$$\text{Teor de silte} = 1000 - \text{teor [argila (g) + areia (g)]} \quad [11]$$

As determinações da condutividade hidráulica saturada foram efetuadas pelo método do permeâmetro de carga constante (Cauduro & Dorfman, 1986). Dos solos objeto de estudo, foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se cilindros metálicos de 7,5 cm de altura, cuidando para preenche-los completamente, obtendo-se 3 repetições para cada camada, quando a espessura das camadas e a pedregosidade nas mesmas permitia.

Nas extremidades inferiores dos cilindros foram colocadas telas de nylon, fixadas com atilhos. As amostras foram colocadas em recipientes plásticos e cheias de água, de modo que 4 cm das amostras ficassem acima do nível de água para saturá-las, permanecendo por um período não inferior a 48 h.

Completada a saturação, foram colocados cilindros de plástico adaptados aos cilindros metálicos e isolados com gel de silicone para evitar posteriores perdas de água.

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada foi montado um suporte de madeira de altura regulável, onde o cilindro metálico foi encaixado num funil plástico encarregado de coletar a água que percolou pela amostra. A água contida no cilindro plástico, situado por cima do cilindro metálico, exerceu uma pressão que foi mantida constante através do nível de água no permeâmetro.

A água que percolou pelas amostras foi coletada e medida com auxílio de proveta graduada a intervalos regulares de 10 minutos, marcados por cronômetro, até eles tornarem-se constantes dentro de uma margem de tolerância de  $\pm 5\%$ .

Após coletados os dados, a condutividade hidráulica saturada  $K$  foi calculada através da seguinte equação:

$$K = \frac{60VL}{A t h} \quad (\text{cm h}^{-1}) \quad [12]$$

onde:

$K$  = condutividade hidráulica;

$V$  = média dos volumes de água “constantes” coletados em cada intervalo de tempo  $t$  ( $\text{cm}^3$ );

$A$  = área da secção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ );

$t$  = tempo, em minutos;

$L$  = altura da amostra (cm)

$h$  = altura da carga (cm).

As determinações da densidade do solo foram efetuadas através do método do anel volumétrico (Cauduro & Dorfman, 1986), utilizando-se cilindros de metal de volume conhecido ou anel de Kopeck (5 cm de altura). Foram extraídas três amostras por camada, quando a espessura das camadas e a pedregosidade nas mesmas permitia.

Os cilindros foram introduzidos em forma vertical mediante a utilização de amostrador. Uma vez preenchidos, os cilindros foram retirados do solo com ajuda de uma faca, assim como os excessos de solo das bordas dos cilindros. O conteúdo de cada anel foi transferido para uma sacola plástica identificada.

As amostras foram secas em estufas a 110°C por 24 h e pesadas para determinar a massa do solo seco. A densidade do solo foi calculada através da equação [13].

$$D_s = \frac{\text{Massa do solo seco}}{\text{Volume do cilindro (cm}^3\text{)}} \quad (\text{g cm}^{-3}) \quad [13]$$

As taxas de infiltração foram determinadas a campo pelo método dos cilindros concêntricos (Cauduro & Dorfman, 1986), realizando-se uma infiltração por perfil. Foram utilizados dois cilindros metálicos de 30 cm de altura e diâmetros de 30 e 50 cm, respectivamente, com uma das bordas biselada, para facilitar a sua penetração no solo.

Colocou-se o cilindro maior (50 cm de diâmetro) sobre a superfície do solo e foi pressionado para penetrar um pouco nele. Colocou-se sobre o cilindro uma base de madeira maciça, para poder golpear esta com uma marreta e permitir a penetração vertical do cilindro aproximadamente 10 cm no solo.

Posteriormente, instalou-se o cilindro menor (30 cm de diâmetro) dentro do maior, de forma concêntrica, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente.

Colocou-se uma lona plástica e água no interior do cilindro interno para evitar a infiltração de água no solo, até formar uma lâmina de aproximadamente 7 cm.

Instalou-se no cilindro interno uma régua graduada com um flutuador e foram registrados os valores das alturas das lâminas de água ou tempo zero.

Introduziu-se água no espaço existente entre o cilindro interno e externo até formar uma lâmina de água de 5 cm para evitar o movimento horizontal da água de infiltração contida no cilindro interno.

Após a retirada da lona de plástico do cilindro interno, acionou-se o cronômetro. As leituras do posicionamento do nível da água, com auxílio da régua graduada, foram feitas aos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos a contar do instante zero. A taxa de infiltração foi calculada pela equação [14].

$$\text{Taxa de infiltração} = (\Delta h / \Delta t) \times 60 \text{ (cm h}^{-1}\text{)} \quad [14]$$

$\Delta h$  = intervalo de tempo (minutos)

$\Delta t$  = lâmina infiltrada (cm)

### 3.5 Análises químicas

As análises químicas realizadas foram determinação de pH em água e em KCl, de condutividade elétrica, do teor de Al trocável, acidez potencial, carbono orgânico, bases trocáveis (Ca, Mg, Na e K), metais totais por ataque sulfúrico (Si, Fe, Al, Ti, Mn, P) e SO<sub>4</sub> solúvel, potenciais de acidificação e potencial de neutralização.

Foram determinados potenciométricamente na suspensão solo-líquido, tanto o pH em água como em KCl, na proporção 1:1, em peso (5 g solo: 5 g de água) (EMBRAPA, 1997).

Mediante a diferença entre os valores de pH em KCl e de pH em água foi calculado o valor do  $\ddot{A}$  pH.

A condutividade elétrica foi determinada nos extratos de saturação e na relação 1:5 (Tedesco et al., 1995), pesando-se 5 g de amostra em tubos de centrífuga de 50 mL e adicionados 25 mL de água destilada. As amostras foram agitadas intermitentemente por uma hora e centrifugadas a 2.000 rpm por 15 minutos para posteriormente ser determinada a condutividade elétrica com condutímetro.

Para a determinação do valor de Al trocável foi utilizada uma metodologia para solos com alto teor de matéria orgânica ou em materiais orgânicos (McLean, 1965). Foram pesadas 2,5 g das amostras em frascos “snap

cup”, adicionados 50 mL da solução de KCl  $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ , agitadas por uma hora e deixadas durante a noite para decantar.

Foram pipetados 25 mL dos sobrenadantes para erlenmeyer de 125 mL, adicionadas 3 gotas de fenolftaleína como indicador e titulados com NaOH  $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ . Na mesma solução adicionaram-se 1 gota de HCl  $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  e 5 mL da solução de NaF  $40 \text{ g L}^{-1}$  e procedeu-se a agitação até ficar com coloração rosa. As amostras foram tituladas com HCl  $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  até desaparecer a cor. A determinação do Al trocável foi realizada mediante a seguinte equação:

$$\text{Al (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = \frac{[V \text{ amostra (mL)} - V \text{ branco (mL)}] \times V \text{ HCl} \times 100 \times 2}{\text{Massa do solo (g)}} \quad [15]$$

onde;

V amostra (mL) = volume de HCl gasto na titulação da amostra;

V branco (mL) = volume de HCl gasto na titulação da prova em branco;

M HCl = molaridade da solução de HCl padronizada;

100 = fator para conversão do valor final a kg de solo;

2 = fator de conversão devido á titulação de 25 mL do volume total de 50 mL;

Massa do solo (g) = massa do solo usada na extração

A acidez potencial (H+Al) foi determinada utilizando o acetato de cálcio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7 como extrator (EMBRAPA, 1997), onde foram pesadas 5 g de amostra em erlenmeyer de 125 mL e adicionados 75 mL do extrator. As amostras foram agitadas manualmente algumas vezes no dia e deixadas para decantar durante uma noite.

Foram pipetados 25 mL dos sobrenadantes e titulados com NaOH  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  com 3 gotas de fenolftaleína como indicador. Os volumes gastos na titulação foram utilizados para a determinação da acidez potencial através da equação [16].

$$\text{H+Al (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = [V \text{ amostra (mL)} - V \text{ branco (mL)}] \times M \text{ NaOH} \times Fc \quad [16]$$

onde;

V amostra (mL) = volume de NaOH gasto na titulação da amostra

V branco (mL) = volume de NaOH gasto na titulação da prova em branco

M NaOH = concentração da solução de NaOH padronizada

Fc = Fator de correção

O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black modificado (Tedesco et al., 1995), onde as amostras foram primeiramente moídas até passar em peneira de 50 mpp. Posteriormente foram pesadas 2 g para amostras contendo menos de 2% de matéria orgânica (MO); 1 g para amostras com 2 a 4% de MO; 0,5 g para amostras com 4 a 10% de MO; 0,25 g para amostras de 10 a 20% de MO e 0,10 g para amostras com mais de 20% de MO em frascos de erlenmeyer de 250 mL.

Após adicionados 10 mL de  $K_2Cr_2O_7$   $1,25 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  as amostras foram agitadas levemente para acrescentá-las com mais 20 mL de  $H_2SO_4$  concentrado.

Posteriormente as amostras foram aquecidas num bico de Bunsen agitando vagarosamente até atingir  $150^\circ\text{C}$  em aproximadamente um minuto e esfriadas para adicionar mais 50 mL de água destilada passando a agitar brevemente.

As amostras foram transferidas a uma proveta para ajustar o volume a 100 mL, homogeneizadas e deixadas em repouso por 30 minutos.

Após transferido 50 mL do sobrenadante para um Beaker de 250 mL e adicionado 3 gotas de indicador ferroin as amostras foram tituladas com  $FeSO_4$   $\text{mol}_c \text{ L}^{-1}$ .

As bases trocáveis (Ca, Mg, K, Na) foram determinadas através do método do acetato de amônio a pH 7 (EMBRAPA, 1997), onde foram pesadas 5,0 g de amostra, colocadas em erlenmeyer de 250 mL e adicionados 50 mL de acetato de amônio a pH 7.

As amostras foram agitadas manualmente durante várias vezes ao dia e deixadas em repouso durante a noite após a última agitação.

No sobrenadante, foram determinados os teores de  $Na^+$  e  $K^+$  pelo fotômetro de chama, enquanto os teores de  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$  por espectrometria de absorção atômica.

Os teores totais de Si, Fe, Al, Ti, Mn e P foram determinados mediante ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997), pesando-se 1,0 g de amostra em Erlenmeyer de 500 mL e adicionados 20 mL de ácido sulfúrico diluído de 1:1. As amostras foram fervidas por meia hora utilizando-se funis como condensadores de refluxo para evitar a evaporação.

Após esfriadas as amostras, foram adicionados 50 mL de água destilada e filtradas para balão aferido de 250 mL, lavando-se o resíduo com água destilada até completar o volume.

Os materiais filtrados foram utilizados para as determinações das concentrações de Fe, Al, Ti, Mn e P total mediante espectrofotometria de absorção atômica, enquanto os resíduos foram utilizados para a determinação da sílica.

Os resíduos retidos no papel de filtro foram passados, com ajuda de água (usando aproximadamente 150 mL), para o mesmo erlenmeyer utilizado no ataque sulfúrico, onde foram adicionados 4 mL de solução de NaOH a 30% e colocados em placa elétrica até início de fervura.

As amostras foram esfriadas, transferidas para balões aferidos de 200 mL e completadas com água, onde novamente foram filtradas e coletadas em frascos de polietileno.

Os materiais coletados foram utilizados na determinação da sílica mediante espectrofotometria de absorção atômica.

Os índices  $K_i$  e  $K_r$  foram determinados a partir das seguintes equações:

$$K_i = [\% \text{ de SiO}_2 \times 1,7] / \% \text{ de Al}_2\text{O}_3 \quad [17]$$

$$K_r = (\% \text{ de SiO}_2 / 0,60) / [(\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 / 1,02) + (\% \text{ de Fe}_2\text{O}_3 / 0,60)] \quad [18]$$

O sulfato solúvel foi determinado utilizando como extrator, solução de  $\text{CaCl}_2$  0,1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (Bissani et al., 1995), onde foram pesadas 2,0 g de amostra, agitadas por 30 minutos em 50 mL do extrator, ficando após em decantação por 16 h.

Foram pipetados 20 mL do sobrenadante para tubos de secagem e evaporados a 120-130°C até secar. Depois de esfriados foi adicionado 1 mL de solução de  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  3:1 e novamente aquecidos a 150-160°C por mais 10 minutos com os tubos tampados com pequenos funis. Passados os 10 minutos, foram retirados os funis e mantidas as amostras a 150-160°C por mais 10 minutos.

Após esfriadas, às amostras foram adicionados 10 mL de água destilada e 1 mL de gelatina-BaCl<sub>2</sub> e agitadas. Passados 30 minutos, o sulfato solúvel foi determinado por absorvância em 440 nm (Tedesco et al., 1995).

Para a determinação do potencial de acidificação (PA) e o potencial de neutralização (PN) foi utilizado o método do peróxido de hidrogênio modificado (O'Shay et al., 1990), com algumas adaptações (Pinto, 1997).

Para a remoção dos carbonatos, foram pesadas 5,0 g de amostra em tubos de centrifuga de 100 mL, adicionados 25 mL de HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> e aquecidos em banho maria por 45 minutos.

Para remover a acidez residual, foi utilizada a lavagem com 25 mL de CaCl<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> seguida de centrifugação, repetida duas vezes.

O potencial de neutralização (PN) foi determinado pelo consumo do ácido adicionado a amostra por titulação com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

Os resíduos que ficaram nos tubos de centrifugação foram secados em estufa a 40°C. Pesou-se 1,0 g desse material em copos erlenmeyer de 300 mL cobertos com vidros de relógio e colocados para fervura em banho de areia.

Foram adicionados aos poucos 100 mL de peróxido livre de estabilizantes (marca Merck) e fervidas as amostras por 60 minutos. Após transcorridos os 60 minutos de fervura, nas amostras onde o peróxido estava completamente decomposto, foram adicionadas mais 50 mL deste produto e fervidas por outros 60 minutos, até assegurar o excesso do peróxido.

Posteriormente as amostras foram esfriadas a temperatura ambiente, adicionado-se 1 mL de Cu(CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) 0,0157 mol L<sup>-1</sup> e fervidas por mais 15 minutos para decompor o excesso de peróxido.

As amostras foram filtradas e lavadas com solução de CaCl<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup>, para remover a acidez trocável, completando aproximadamente 150 mL e tituladas até atingir pH 7 com NaOH 0,05 mol L<sup>-1</sup>.

As fórmulas utilizadas na determinação do PN e PA foram as seguintes:

$$PN = \frac{[V \text{ branco (mL)} - V \text{ amostra (mL)}] \cdot \text{concentração base} \times 50}{\text{peso amostra (g)}} \quad [19]$$

$$PA = \frac{V \text{ gasto amostra mL} \times \text{concentração base} \times 50}{\text{peso amostra (g)}} \quad [20]$$

Para a análise dos dados obtidos foram utilizados alguns parâmetros de estatística descritiva como média, máximo, mínimo e desvio padrão, utilizando-se o programa SigmaPlot 8.02 (SigmaPlot Science Software, 2002).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A fim de comparar solos construídos de distintas idades, foram selecionadas na mina de carvão Boa Vista duas sub-áreas de solos construídos, respectivamente de 24 anos (SA-24) e de dois anos (SA-2). Do mesmo modo, foram analisados o solo natural e a coluna geológica.

Os resultados das análises físicas realizadas nos solos amostrados, além de serem utilizadas para fins comparativos, permitiram a identificação das características limitantes destas áreas que podem influir na sua recuperação satisfatória. Por sua vez, as análises químicas conduziram ao melhor conhecimento dos processos químicos e pedogenéticos destas áreas.

### **4.1 Características morfológicas**

Nas sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2 foram identificadas feições morfológicas relevantes como as diferenças entre camadas originadas da sucessiva sobreposição de materiais heterogêneos, espessuras variáveis das camadas e diversos tipos de transições entre camadas.

Para a identificação e denominação das seções horizontais componentes dos solos construídos, habitualmente denominadas de horizontes nos solos naturais, utilizou-se a denominação de camadas de solo, devido à alteração das propriedades físicas e das feições morfológicas que sofrem estes materiais durante a extração e reconstrução.

As camadas superficiais foram identificadas como A, representando, geralmente, os distintos horizontes dos solos naturais, que se encontram fisicamente alterados e misturados entre si. As alterações sofridas por estes materiais tornam difícil a reposição dos mesmos na seqüência original,

dificultando sua identificação. As camadas sub-superficiais foram identificadas como C e representam o material estéril, que consiste de argilitos, siltitos, folhelhos carbonosos e o próprio carvão, apresentando-se fisicamente alterados, tornando-se extremamente difícil a individualização de cada material.

Outra característica destacada é a variedade de cores presentes nestes solos e a variabilidade entre camadas (Figuras 5 e 6). A coloração das camadas varia em função do tipo de material utilizado e dos processos químicos que ocorreram ao longo do tempo, especialmente do processo de oxidação.

Nos perfis da sub-área de solos construídos SA-24, observa-se uma coloração da camada superficial A que varia de bruno avermelhado (2,5YR 4/4) a bruno avermelhado escuro (5YR 3/3), enquanto que as camadas sub-superficiais apresentam uma variedade muito grande de cores das matrizes como bruno oliváceo claro (2,5Y 5/6); cinzento escuro (5YR 4/1); bruno amarelado (10YR 5/8); vermelho (10R 4/6); assim como muitos mosqueados de cores como bruno acinzentado (2,5Y 5/2); preto (2,5Y 2,5/0) entre outros.

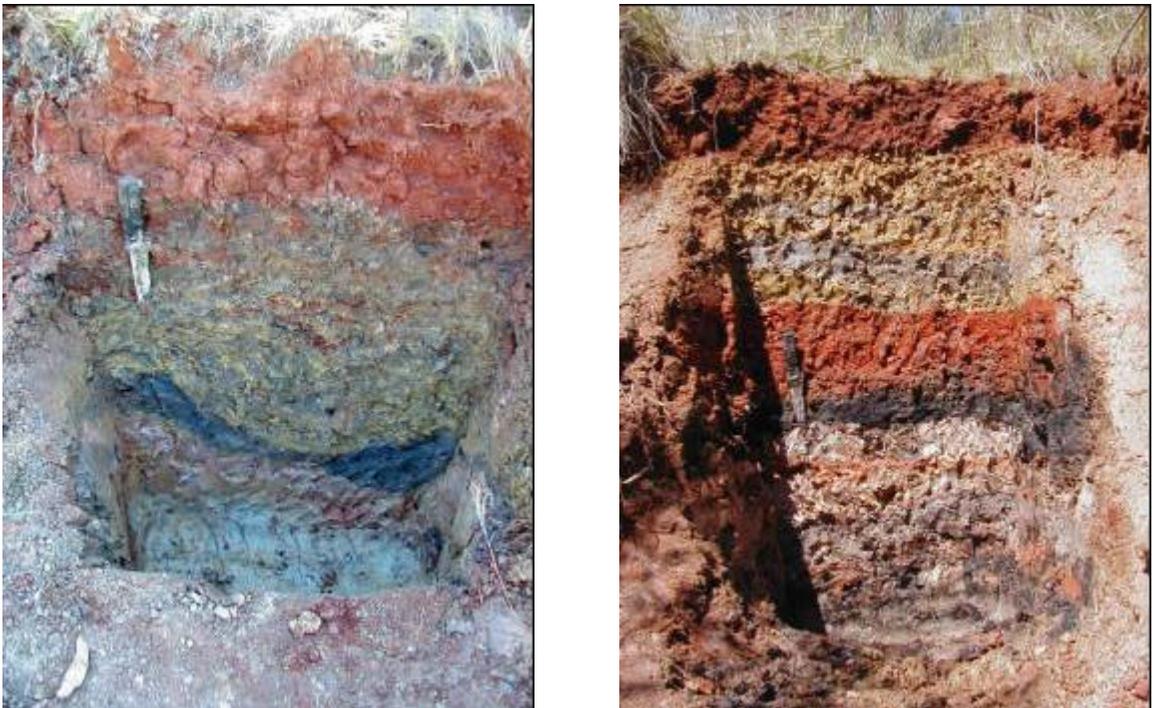
Na sub-área de solos construídos SA-24, os perfis P1-24 e P4-24 apresentam a melhor cobertura vegetal. Esta cobertura vegetal está constituída por espécies de reflorestamento, como *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*, assim como de espécies rasteiras, principalmente de gramíneas nativas. Nestes perfis, pode ser observada a acumulação de acículas em avançado estado de decomposição, formando uma pequena camada superficial de 3 a 4 cm, de coloração escura, como pode ser observado na Figura 7. Na camada A destes perfis, observam-se agregados estruturais incipientes em blocos sub-angulares, assim como poros muito pequenos, que não são evidentes nas camadas sub-superficiais destes.

Tanto no perfil P1-24 como no P4-24, observa-se um bom desenvolvimento de raízes (Apêndices 2 e 5), sendo abundantes superficialmente e apresentando diversos tamanhos e diâmetros. Ao longo dos perfis observa-se uma diminuição desta abundância de raízes com a profundidade, até o ponto de não ocorrerem nas camadas sub-superficiais mais profundas.

Os perfis P1-24 e P4-24 apresentam transições entre camadas que variam entre abrupta plana, gradual plana e difusa plana (Apêndices 2 e 5).



**FIGURA 5.** Perfil P2-2 (esquerda) e perfil P3-2 (direita) da sub-área de solos construídos SA-2.



**FIGURA 6.** Perfil P2-24 (esquerda) e perfil P3-24 (direita) da sub-área de solos construídos SA-24.



**FIGURA 7.** Acumulação superficial de acículas no perfil P4-24.

A fração granulométrica predominante na maioria das camadas dos solos construídos SA-24 é a argila (Apêndices 10 a 13), sendo que as camadas apresentam várias classes texturais como muito argilosa, argilo siltosa e argilosa, com exceção das camadas do perfil P4-24, que possuem predomínio da fração granulométrica areia, sendo as primeiras três camadas do perfil de textura franco arenosa e as restantes três de textura franco argilo arenosa (Apêndice 13).

O perfil P2-24 representa uma capoeira com alto índice de erosão e degradação física, com desenvolvimento de vegetação rasteira cobrindo parcialmente esta área e presença de grandes voçorocas originadas pelas enxurradas das chuvas. A feição morfológica destacada é a ausência de agregados estruturais tanto na camada A como nas camadas sub-superficiais, apresentando em todos os casos estrutura maciça (Apêndice 3). Salienta-se que no local onde foi descrito este perfil existia um bom desenvolvimento da vegetação rasteira.

No perfil P2-24, todas as camadas não apresentam poros visíveis, destacando-se o desenvolvimento de pequenas raízes, tanto na camada superficial como em algumas camadas subsuperficiais (Apêndice 3), diminuindo gradualmente a abundância e o tamanho das mesmas com a profundidade.

O perfil P3-24 foi descrito no barranco de uma voçoroca, onde a vegetação de reflorestamento está constituída por *Pinus* e a vegetação rasteira por gramíneas. A vegetação de reflorestamento exibe pouco desenvolvimento em comparação às áreas de solo natural. Esta sub-área apresenta uma condição

particular de estabilidade ou equilíbrio no avanço de degradação, caracterizada pela presença de uma voçoroca profunda com desenvolvimento vegetal no interior da mesma que impede a evolução dos processos erosivos.

O perfil P3-24 apresenta todas as camadas maciças, sem estrutura e poros visíveis, com transições planas e abruptas, possuindo superficialmente uma quantidade significativa de raízes (Apêndice 4), que vai diminuindo em profundidade, como acontece com os demais perfis da sub-área de solos construídos SA-24.

Nos perfis P1-24, P3-24 e P4-24 da sub-área de solos construídos SA-24, observam-se camadas subsuperficiais com presença de nódulos e concreções (Apêndices 2, 4 e 5). Nas camadas subsuperficiais do perfil P4-24, além de nódulos e concreções, encontram-se cascalhos em abundância (Apêndice 5).

Na sub-área de solos construídos SA-2, os perfis foram situados numa toposequência com declividade que varia de 1% a 8%. O perfil P3-2 representa a parte mais plana com 1% a 2% de declividade, situada no topo da toposequência; o perfil P2-2 representa a parte média da toposequência, com uma declividade de 4% e, por último, o perfil P1-2 está situado no sopé da toposequência, com uma declividade aproximada de 8%.

A sub-área de solos construídos SA-2 é constituída por uma vegetação rasteira pouco desenvolvida e rala, destacando-se esta condição na parte média e baixa da paisagem, onde os efeitos do processo erosivo são mais evidenciados pela presença de encrostamento superficial e de deposição de materiais erodidos. A vegetação de reflorestamento (*Eucalyptus sp.*) encontra-se na fase inicial de crescimento, escassamente desenvolvida, como consequência dos problemas físicos e químicos existentes nos solos destas sub-áreas.

O perfil P1-2 apresenta uma camada superficial de solo natural de 58 cm, enquanto que os perfis P3-2 e P2-2 apresentam camadas superficiais de 14 cm e 16 cm, respectivamente.

A maioria das camadas dos solos construídos SA-2 apresentam textura com predomínio da fração argila, com classes texturais que variam entre argilo siltosa, franco argilo siltosa, argilosa ou franco argilo arenosa (Apêndices 14 a 16).

Nos solos construídos SA-2, todas as camadas, tanto superficiais como subsuperficiais, apresentam-se maciças, sem estrutura, com exceção da camada superficial do perfil P3-2 que apresenta grãos simples, sem estrutura (Apêndices 6 a 8). Nos perfis P2-2 e P3-2, destaca-se a abundância de cascalho na camada superficial, fato que não foi observado nas camadas subsuperficiais (Apêndices 7 e 8).

Nos perfis da sub-área de solos construídos SA-2, a cor das camadas superficiais não foi descrita por causa da dificuldade na identificação das cores principais dos materiais que compõem estas camadas por causa da coloração variegada muito complexa, resultado da intensa mistura de materiais. As camadas subsuperficiais apresentam uma variedade muito grande de cores na matriz do solo como bruno amarelado claro (2,5Y 6/4), cinzento escuro (2,5Y 4/0), bruno oliváceo (2,5Y 4,5/4), cinzento oliváceo (5Y 4/2), assim como muitas inclusões e mosqueados de cores como vermelho (2,5YR 4/6), preto (2,5Y 2,5/2), bruno acinzentado escuro (2,5Y 4/2) e amarelo oliváceo (2,5Y 6/8), entre outros.

A partir das observações descritas nos distintos perfis das sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2, pode-se estabelecer algumas relações e comparações através das feições morfológicas destacadas em cada situação particular.

A acumulação superficial de acículas que apresentam os perfis P1-24 e P4-24 ainda não evidencia a acumulação de matéria orgânica na camada superficial, demonstrando que a estrutura incipiente constatada nestes perfis não se formou por influência de material orgânico acumulado, mas provavelmente, pela ação das raízes que aparecem nestas camadas e possuem um bom desenvolvimento. A presença de agregados estruturais incipientes confirma as informações de que os solos construídos formam estrutura ao longo do tempo (Sencindiver & Ammons, 2000).

A presença de camadas subsuperficiais maciças e sem estrutura, está diretamente relacionada à compactação dos materiais que compõem estes solos, ocasionadas pelo tráfego das máquinas empregadas na reconstituição da paisagem. A compactação das camadas foi favorecida pelo predomínio da fração argila encontrada na maioria das camadas dos solos construídos. O alto conteúdo de argila representa uma desvantagem quando a estrutura do solo é

completamente destruída, como acontece durante o processo de extração e construção das áreas mineradas (Snarski, et al, 1981).

O conteúdo de argila nas camadas dos diversos perfis das sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2 varia irregularmente em profundidade, não existindo indícios de uma mudança textural abrupta entre camadas, demonstrando que estes solos foram construídos mediante a sobreposição de sedimentos geológicos heterogêneos.

Nos perfis P2-2 e P3-2 foram observadas camadas superficiais com presença de cascalho comum a abundante, fato que foi igualmente observado no solo natural, indicando que o material que recobre superficialmente estes perfis foi originalmente solo natural ou parte dele.

Na sub-área de solos construídos SA-24, especificamente nos perfis P1-24, P3-24 e P4-24, a constatação da presença de materiais grosseiros pode afetar o desenvolvimento das raízes e a capacidade de retenção de água entre outras propriedades do solo, como foi constatado por Haering et al. (1993), em um experimento realizado em minas de carvão no condado de Wise, estado de Virginia (EUA).

Nas camadas dos solos construídos SA-2, ainda podem ser diferenciados os materiais originais utilizados para o preenchimento das cavas, os quais não sofreram grandes alterações ou modificações, em comparação aos solos construídos SA-24, que já tiveram seu material de origem mais alterado.

A diferença de espessura das camadas superficiais nos perfis P1-2, P2-2 e P3-2 evidencia o intenso processo de erosão, transportando materiais das porções altas para as porções baixas da paisagem.

## **4.2 Características físicas**

### **4.2.1 Textura**

Na Tabela 1 e na Figura 8, observa-se a distribuição média das partículas de solo por tamanho, tanto no solo natural como nos solos construídos SA-24 e SA-2 e na coluna geológica.

A amplitude de variação dos teores de areia é de 4 a 700 g kg<sup>-1</sup>, apresentando teores médios de 203, 272, 146 e 58, respectivamente nos solo

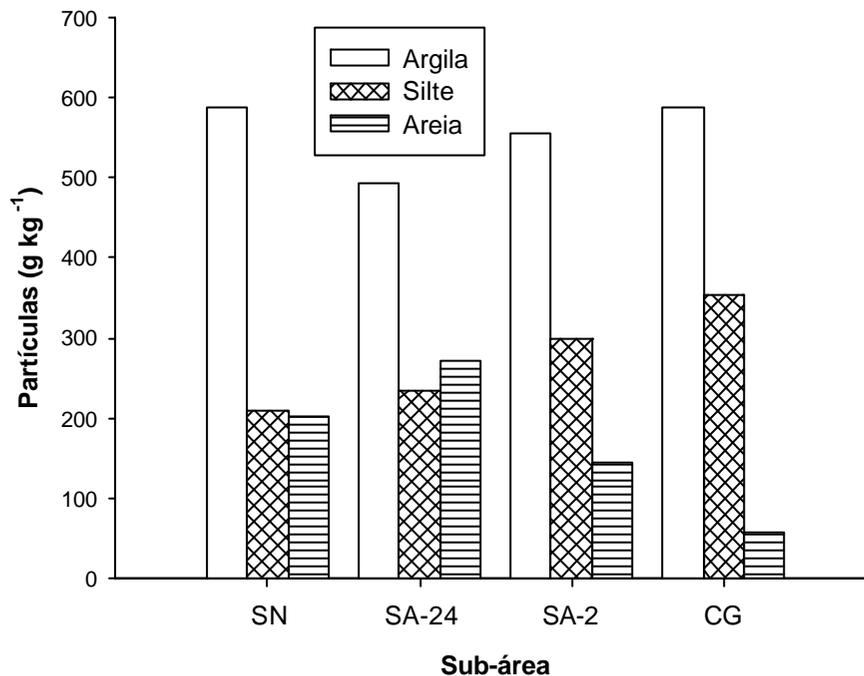
natural, SA-24, SA-2 e na coluna geológica, enquanto que nos teores de silte esta amplitude é de 9 a 645 g kg<sup>-1</sup>, com teores médios de 209, 235, 299 e 355, respectivamente nos solo natural, SA-24, SA-2 e na coluna geológica. Já os teores de argila variam de 129 a 785 g kg<sup>-1</sup>, com teores médios de 588, 493, 555 e 587, respectivamente nos solo natural, SA-24, SA-2 e na coluna geológica.

**TABELA 1** – Valores médios de distribuição de tamanho de partículas de solo (g kg<sup>-1</sup>) no solo natural, nos solos construídos SA-24 e SA-2 e na coluna geológica.

	Areia	Silte g kg <sup>-1</sup>	Argila
<b>Solo Natural</b>			
<b>Média</b>	203	209	588
<b>Desvio Padrão</b>	127	40	166
<b>Mínimo</b>	110	184	295
<b>Máximo</b>	426	279	700
<b>n</b>	5	5	5
<b>Solos construídos SA-24</b>			
<b>Média</b>	272	235	493
<b>Desvio Padrão</b>	260	107	198
<b>Mínimo</b>	4	9	129
<b>Máximo</b>	700	470	715
<b>n</b>	23	23	23
<b>Solos construídos SA-2</b>			
<b>Média</b>	146	299	555
<b>Desvio Padrão</b>	197	146	166
<b>Mínimo</b>	8	23	315
<b>Máximo</b>	660	645	785
<b>n</b>	18	18	18
<b>Coluna Geológica</b>			
<b>Média</b>	58	355	587
<b>Desvio Padrão</b>	118	82	139
<b>Mínimo</b>	5	210	310
<b>Máximo</b>	369	450	785
<b>n</b>	9	9	9

O predomínio da fração argila nestas áreas (Tabela 1 e figura 8) deve-se à constituição do material de origem, composto em grande parte por rochas pelíticas siltico-argilosas (Pinto, 1997). Em áreas de mineração na mesma região, também se destaca o predomínio de textura argilosa nas minas Butiá-Leste e Recreio da COPELMI Mineração Ltda (Kämpf et al., 2000), confirmando as observações realizadas na mina de carvão Boa Vista.

Nos solos construídos SA-24 e SA-2, a granulometria varia irregularmente com a profundidade na maioria dos casos. Não há evidências de translocação de argila, o que identificaria o desenvolvimento de um horizonte B textural, com exceção do solo natural (Apêndice 9). Este fato novamente indica que os solos construídos são resultantes da superposição de materiais heterogêneos e que a irregularidade da textura está fortemente relacionada à granulometria dos sedimentos geológicos empregados na construção dos solos (Kämpf et al., 2000).



**FIGURA 8.** Valores médios da distribuição do tamanho de partículas do solo natural (SN), solos construídos SA-24 e SA-2 e coluna geológica (CG).

Os solos construídos da sub-área SA-2, além de apresentarem altos teores de argila (Figura 8), possuem também elevados teores de silte ( $299 \text{ g kg}^{-1}$ ), passando a representar a segunda fração de terra fina predominante na mesma, contribuindo para a compactação, para o encrostamento da superfície do solo (Brady, 1989) e para o aumento do potencial de erosão.

Igualmente, Bussler et al. (1984), no sudoeste de Indiana (EUA), verificaram o predomínio de silte em solos construídos, devendo-se neste caso ao fato de o solo natural da região apresentar altos teores de silte em sua fração granulométrica.

No caso dos solos construídos SA-2, o teor de silte provém do material da coluna geológica, que apresenta valores médios similares aos dos solos construídos SA-2, como pode ser observado na Tabela 1 e Figura 8.

Tanto os valores mínimos e máximos, assim como os desvios padrões resultantes da análise estatística clássica realizada nos solos construídos mostram que estes possuem uma grande variabilidade e heterogeneidade nos tamanhos de partículas em suas camadas.

Os dados da textura, assim como da descrição morfológica indicam que os solos construídos estão constituídos por camadas distintas em profundidade, mas homogênea internamente, com características e propriedades diferentes dos materiais originais. Segundo Potter et al. (1988), as diferenças texturais entre solos construídos e os materiais de referência são devidas, provavelmente, à mistura destes materiais durante a recomposição das áreas mineradas.

#### **4.2.2 Densidade do solo e condutividade hidráulica saturada**

Os dados médios da densidade do solo e da condutividade hidráulica saturada dos solos construídos das sub-áreas SA-24 e SA-2 são apresentados na Tabela 2 e na Figura 9.

Os solos construídos SA-24 e SA-2 apresentam uma alta densidade do solo, variando entre 1,7 e 2,4 g cm<sup>-3</sup>, com médias de 1,9 e 2,0 g cm<sup>-3</sup> para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

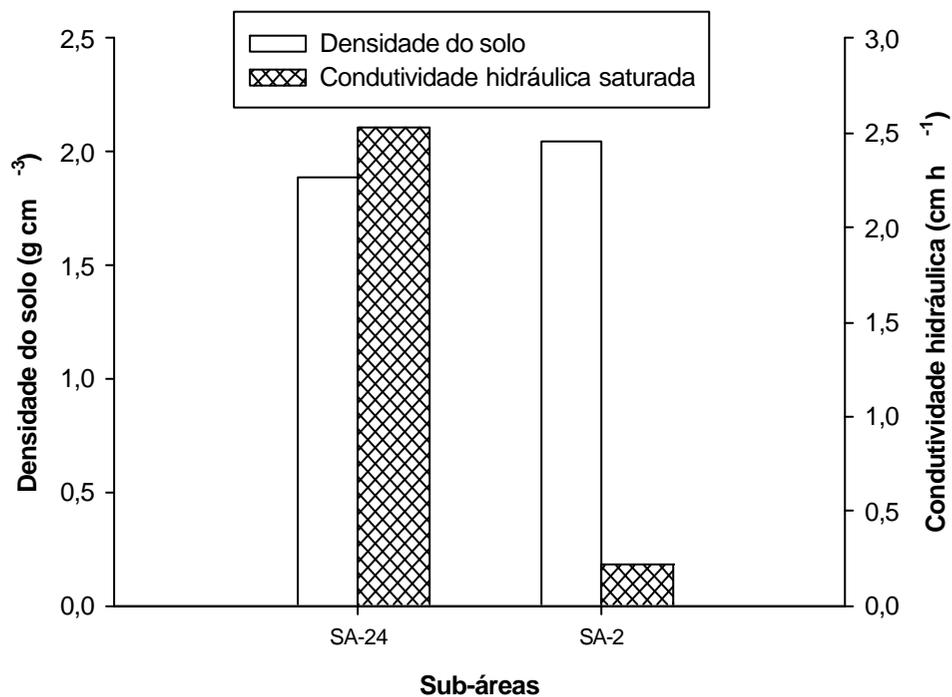
A condutividade hidráulica saturada dos solos construídos SA-24 varia de muito lenta (0,0 cm h<sup>-1</sup>) a moderadamente rápida (9,6 cm h<sup>-1</sup>), com uma média de 2,5 cm h<sup>-1</sup>, enquanto nos solos construídos SA-2 apresenta-se muito lenta (0,0 cm h<sup>-1</sup>) a moderadamente lenta (1,1 cm h<sup>-1</sup>), com um valor médio de 0,2 cm h<sup>-1</sup>.

A alta densidade do solo e a baixa condutividade hidráulica saturada nas duas sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2 demonstram que estes solos se encontram intensamente compactados. Este fato deve-se ao tráfego de máquinas pesadas empregadas durante os processos de remoção, transporte e reconstituição da paisagem. Após estes processos, o material pode chegar ao destino final com vários graus de desagregação ou compactação, dependendo do teor de umidade (McSweeney & Jansen, 1984; Potter et al., 1988). Esta situação

vé-se amplamente favorecida pela textura argilosa que apresentam estes solos, como foi anteriormente citado.

**TABELA 2.** Densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica saturada (K) dos solos construídos SA-24 e SA-2.

	Ds g cm <sup>-3</sup>	K cm h <sup>-1</sup>
<b>Solos construídos SA-24</b>		
<b>Média</b>	1,9	2,5
<b>Desvio Padrão</b>	0,1	3,4
<b>Mínimo</b>	1.7	0.0
<b>Máximo</b>	2.0	9.6
<b>n</b>	13	13
<b>Solos construídos SA-2</b>		
<b>Média</b>	2,0	0,2
<b>Desvio Padrão</b>	0,2	0,3
<b>Mínimo</b>	1.7	0.0
<b>Máximo</b>	2.4	1.1
<b>n</b>	11	11



**Figura 9.** Médias da densidade do solo e da condutividade hidráulica saturada das sub-áreas de solos construídos SA-24 e SA-2.

Na seção 4.2.1 foi ressaltada a influência do teor de silte na compactação do solo, no encrostamento superficial e no aumento do potencial de erodibilidade. Quanto à compactação dos solos nas camadas dos perfis P2 -2 e

P3-2, que apresentam maior teores de silte, foram obtidos os maiores valores de densidade do solo, entre eles os dois valores mais altos (2,4 e 2,3 gcm<sup>-3</sup>), ratificando a afirmação expressa anteriormente (Apêndices 15 e 16).

A compactação dos solos construídos resulta na diminuição do tamanho de poros, implicando na redução da condutividade hidráulica saturada e na diminuição das taxas de infiltração, acarretando uma maior exposição à erosão e escoamento superficial. Esta condição física restringe o desenvolvimento radicular da vegetação de cobertura destas áreas (Giasson et al., 1995; Kämpf et al., 2000).

A densidade dos solos construídos, tanto na sub-área SA-24 (Apêndices 10, 11 e 12) como na sub-área SA-2 (Apêndices 14 e 16) aumenta com a profundidade do solo. Pedersen et al. (1980), estudando as características físicas de alguns solos construídos da Pensilvânia, também verificaram que a densidade dos mesmos aumenta com a profundidade. A variabilidade da densidade do solo com a profundidade está relacionada à sua morfologia e é atribuída à complexidade dos materiais de origem que compõem estes solos, segundo as observações de Bell et al. (1994). Esta particularidade dos solos construídos pode estar relacionada a alguns fatores que explicam este fenômeno nos solos naturais, tais como o peso das camadas sobrejacentes, o menor teor de matéria orgânica e a menor agregação do solo (Kiehl, 1979), assim como a desestruturação que sofrem durante os processos de mineração e reposição da paisagem.

Embora os valores médios da densidade dos solos construídos SA-24 e SA-2 não demonstrem a existência de diferenças que permitam afirmar que os solos construídos SA-24 apresentam menor densidade do solo que os solos construídos SA-2. Pelos resultados individuais de cada perfil, constata-se que a densidade do solo é maior nos solos construídos SA-2 (Apêndices 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16),

A diferença entre os valores de densidade dos solos construídos SA-24 e SA-2 pode dever-se principalmente à diferença de métodos e materiais utilizados para sua construção, assim como a eventual construção destas áreas com distintos teores de umidade (Nunes, 2002).

Por outro lado, os solos construídos SA-24 apresentam uma melhor condutividade hidráulica saturada em comparação aos solos construídos SA-2.

Destaca-se a rápida condutividade hidráulica saturada nas camadas superiores e a lenta nas camadas sub-superficiais (Apêndices 10, 11, 12, 13), fato que foi igualmente observado numa mina de Dakota do Norte (EUA) por Potter et al. (1988). Segundo este autor, este fenômeno ocorre pelo aumento da macroporosidade e permeabilidade devido ao efeito do desenvolvimento das raízes e da atividade da fauna do solo.

Nos solos construídos SA-24, especificamente nos perfis P2-24, P3-24 e P4-24, a presença de insetos como formigas e escorpiões, assim como o bom desenvolvimento da cobertura vegetal desta sub-área, destacando-se as gramíneas que possuem um sistema radicular denso, provavelmente contribui com a formação destes macroporos, aumentando a permeabilidade das camadas superficiais dos solos desta sub-área (Apêndices 11, 12 e 13). Outro fator que colabora para a melhor condutividade hidráulica saturada nos solos construídos SA-24 é a menor densidade do solo nesta sub-área em comparação aos solos construídos SA-2.

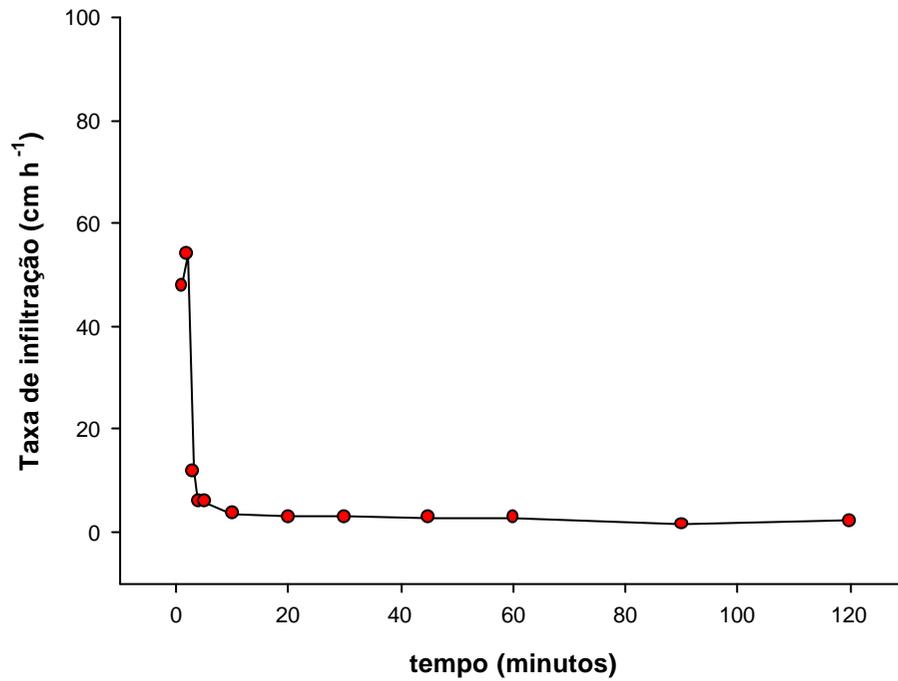
No solo natural, tanto a densidade do solo como a condutividade hidráulica saturada não foram determinadas porque a mineração de carvão avançou até esta sub-área, perdendo-se o perfil onde foram feitas as descrições morfológicas e a coleta para as análises químicas. Porém este fato não afetou fundamentalmente o desenvolvimento do trabalho, pois buscava-se principalmente comparar solos construídos de diferentes idades.

### **4.2.3 Infiltração de água**

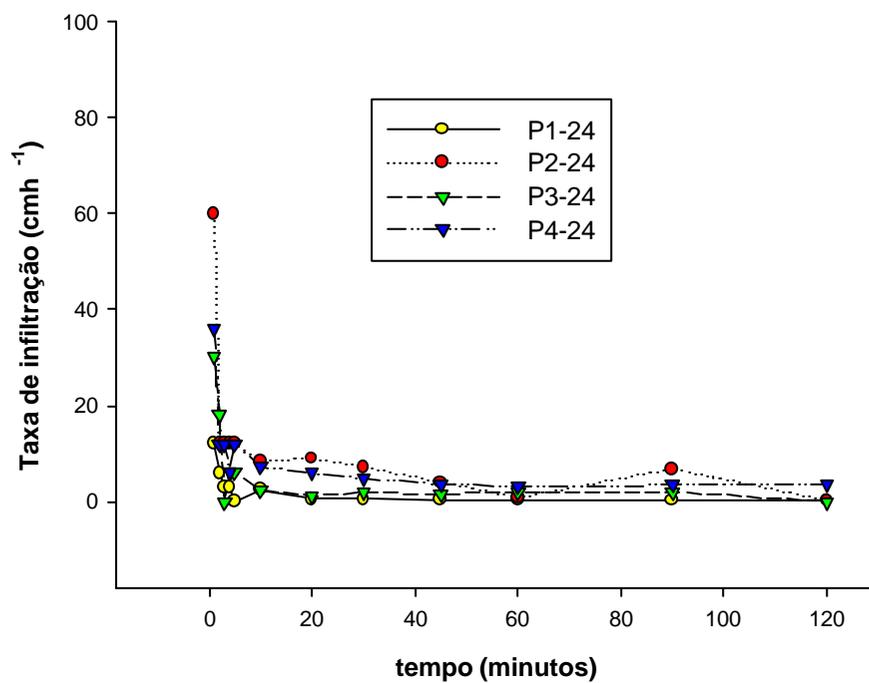
Nas Figuras 10, 11 e 12, podem ser observadas as taxas de infiltração de água no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2.

As taxas de infiltração, tanto no solo natural como nos solos construídos, apresentam-se baixas. O solo natural apresenta em média uma taxa final de infiltração de 12,1 cm h<sup>-1</sup>, enquanto que os solos construídos SA-24 esta taxa é de 7,4 cm h<sup>-1</sup> e nos solos construídos SA-2 é de 4,5 cm h<sup>-1</sup>. Embora a densidade do solo e a condutividade hidráulica saturada não foram determinadas no solo natural, a taxa de infiltração foi determinada nas adjacências do mesmo. Estes dados permitem contemplar ao solo natural como referência e mesmo para

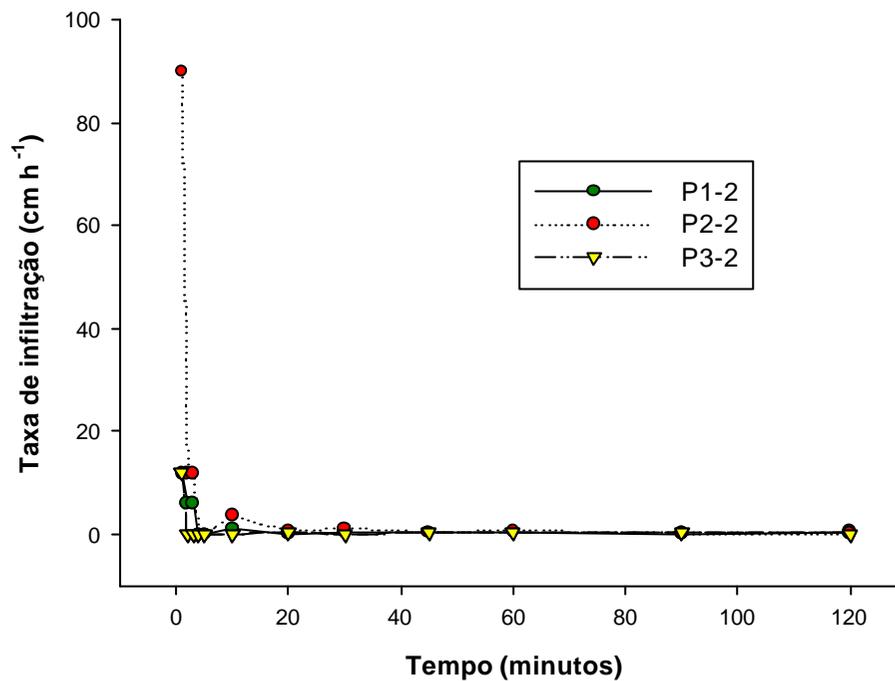
estabelecer algumas comparações com os solos construídos das duas sub-áreas SA-24 e SA-2.



**Figura 10.** Taxa de infiltração de água no solo natural.



**Figura 11.** Taxa de infiltração de água no solo nos perfis P1-24, P2-24, P3-24 e P4-24 da sub-área de solos construídos SA-24.

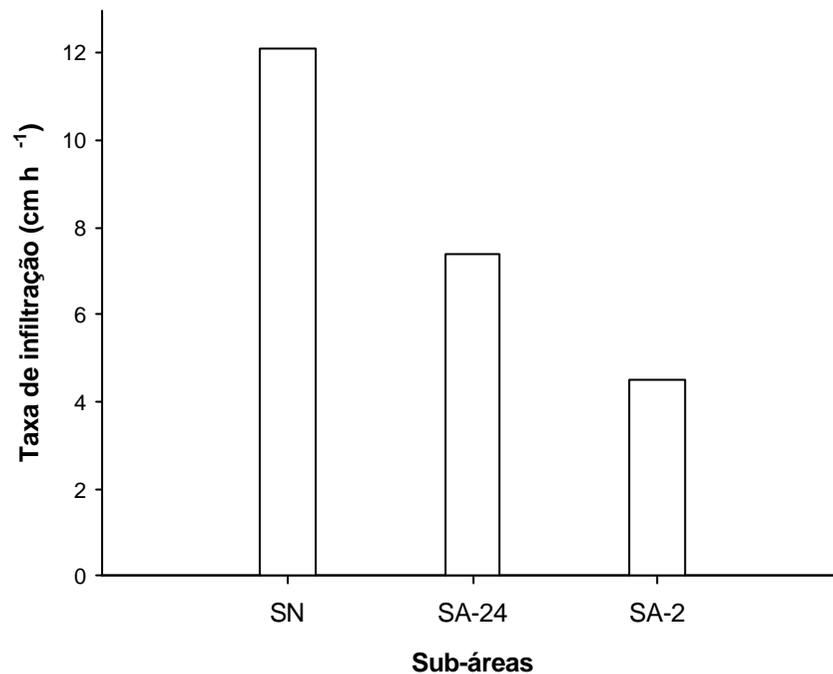


**Figura 12.** Taxa de infiltração de água no solo nos perfis P1-2, P2-2 e P3-2 da sub-área de solos construídos SA-2.

A Figura 13 demonstra que o solo natural apresenta o maior valor médio da taxa final de infiltração, seguido dos solos construídos SA-24 e, por último, dos solos construídos SA-2.

Conforme foi discutido na seção 4.2.2, existem certas condições físicas do solo, como a densidade do solo, que afetam diretamente outras propriedades do solo como a condutividade hidráulica saturada e a infiltração de água. O maior valor médio apresentado da densidade dos solos SA-2 ocasiona nesta sub-área uma menor condutividade hidráulica saturada, assim como menores taxas de infiltração de água no solo.

O solo natural apresenta valor médio mais alto de taxa final de infiltração de água em comparação com os solos construídos SA-24 e SA-2, acreditando-se que as melhores condições físicas que pode apresentar o solo natural, embora estas não tenham sido medidas, sejam responsáveis pelas maiores taxa de infiltração de água, assim como constatado por Potter et al. (1988).



**Figura 13.** Taxa final média de infiltração de água no solo do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2.

Os perfis P2-24, P3-24 e P4-24 apresentam melhores condições físicas superficiais e menor densidade do solo, facilitando a maior taxa inicial de infiltração de água, como pode observar-se na Figura 11, embora na camada superficial do perfil P4-24 não tenha sido medida a densidade do solo, pelo fato do mesmo ter uma espessura de apenas 5 cm.

Já no perfil P2-2, que também apresenta uma alta taxa de infiltração inicial, este fato deve-se à ausência de estrutura na camada superficial, apresentando-se como grãos simples, diferentemente da maioria das camadas dos solos construídos que apresentam estrutura maciça, facilitando a infiltração inicial da água.

A taxa inicial de infiltração de água é rápida, porque as camadas superficiais apresentam condições físicas que favorecem esta situação. A estabilização da taxa de infiltração em todos os perfis ocorre em tempo menor que 20 minutos, demonstrando que transcorrido este tempo o solo começa a oferecer resistência à infiltração da água, que torna-se praticamente nula, como pode ser observado nas Figuras 10, 11 e 12. Esta observação evidencia que as camadas superficiais possuem um menor grau de compactação em comparação às camadas sub-superficiais, como foi constatado nas análises de densidade do

solo, que expressavam um aumento da densidade do solo em profundidade. Potter et al. (1988) observaram este mesmo fenômeno em minas de Dakota do Norte, nos EUA.

Fazendo-se uma comparação entre as duas sub-áreas de solos construídos, a média das taxas finais de infiltração de água dos solos construídos SA-2 apresenta-se menor que dos solos construídos SA-24, como pode ser observado na Figura, 13. Isto é devido provavelmente a que os solos antigos apresentam um melhor desenvolvimento das espécies vegetais, por sua vez diretamente relacionado ao melhor desenvolvimento do sistema radicular e conseqüente aumento da porosidade.

A partir da apresentação e discussão destes dados, pode-se inferir que a caracterização física dos solos construídos serve para avaliar o sucesso ou insucesso das construções destes solos a curto prazo, assim como estabelecer as possíveis limitações ou deficiências físicas que possam apresentar individualmente cada sub-área. Independente das técnicas empregadas para tal caracterização, a alta variabilidade, tanto horizontal como vertical, que apresentam estes solos torna extremamente restrita a utilização e extrapolação dos dados de uma determinada área para avaliar as condições de outras áreas, embora possam ser usados como referência.

Por outro lado, as diferenças dos métodos e dos materiais utilizados na construção e reposição da paisagem, influenciadas pela legislação ambiental vigentes em cada época, assim como o nível de desenvolvimento de pesquisas e conhecimentos tecnológicos, podem ter influído em algumas situações, modificando significativamente as condições dos processos construtivos das áreas mineradas.

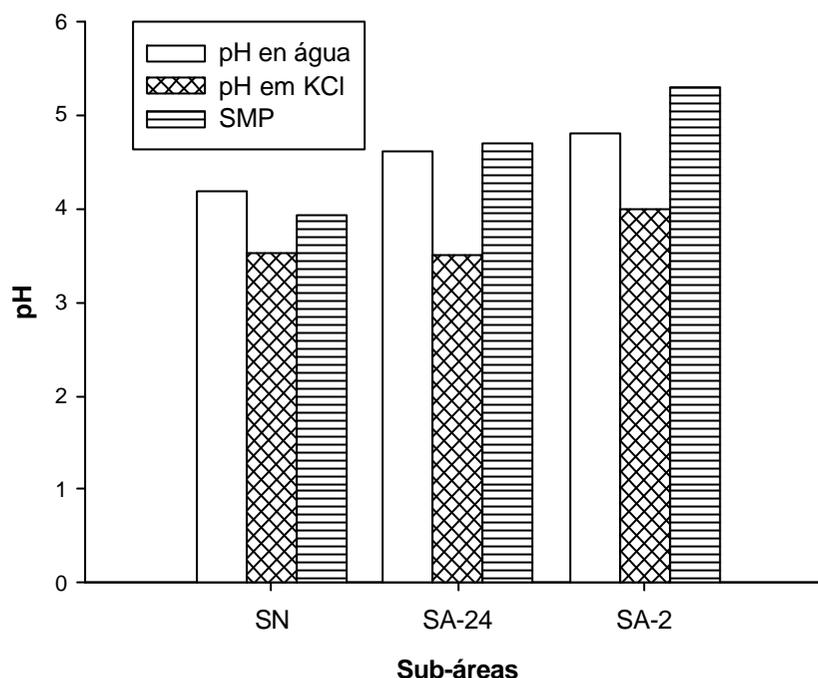
### **4.3 Características químicas**

Na Tabela 3 são apresentadas as médias dos valores das propriedades químicas do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2. O pH em água apresentou uma ampla variação de valores (3,7 a 7,0), com valores médios de 4,2, 4,6 e 4,8, respectivamente para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e os SA-2, conforme pode ser observado na Figura 14.

**Tabela 3.** Propriedades químicas do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2

	pH		SMP	CE	Ca	Mg	Na	K	S	Al	H+Al	CTC <sub>efe</sub>	CTC <sub>pH7</sub>	CO	V	m	
	H <sub>2</sub> O	KCl															ΔpH
					μS cm <sup>-1</sup>	-----cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----							-----%-----				
<b>SOLO NATURAL</b>																	
<b>Média</b>	4,2	3,5	-0,7	3,9	222,9	5,4	8,2	0,1	0,3	14,0	11,8	19,0	25,8	33,0	0,9	41,0	46,8
<b>Dp</b>	0,1	0,0	0,1	0,2	63,1	1,1	6,9	0,1	0,1	6,5	3,6	3,6	7,9	8,9	0,7	10,8	15,3
<b>Min.</b>	4,1	3,5	-0,8	3,6	125,8	3,9	0,6	0,1	0,2	6,5	5,4	13,5	17,6	25,1	0,2	26,0	30,4
<b>Max.</b>	4,3	3,6	-0,6	4,2	275,5	6,8	15,5	0,2	0,4	22,0	13,5	23,4	35,4	42,9	1,8	52,1	67,4
<b>n</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>SOLOS CONSTRUIDOS SA-24</b>																	
<b>Média</b>	4,6	3,5	-1,1	4,7	101,0	3,8	3,7	0,1	0,8	8,4	5,5	15,3	13,9	23,7	1,8	38,7	42,9
<b>Dp</b>	0,5	0,3	0,4	0,6	83,8	2,3	4,2	0,1	0,8	6,0	3,1	14,1	6,5	14,5	3,4	22,0	25,1
<b>Min.</b>	3,7	3,1	-2,1	3,7	9,6	0,5	0,3	<0,01	0,1	1,1	0,3	5,2	7,3	13,8	0,0	3,7	4,2
<b>Max.</b>	5,6	4,2	-0,6	6,1	329,0	9,0	17,0	0,3	2,8	26,7	12,1	34,2	38,8	79,2	14,7	72,0	89,2
<b>n</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>SOLOS CONSTRUIDOS SA-2</b>																	
<b>Média</b>	4,8	4,0	-0,8	5,3	240,6	7,0	5,7	0,2	0,5	13,4	5,6	9,4	19,0	22,8	2,0	63,2	24,5
<b>Dp</b>	1,0	1,0	0,2	1,5	103,7	2,7	4,8	0,1	0,4	5,5	6,3	7,8	9,6	11,0	5,1	21,0	22,0
<b>Min.</b>	3,9	3,0	-1,2	3,3	64,6	2,3	1,4	<0,01	0,1	6,4	0,0	0,5	0,0	10,0	<0,01	33,5	0,0
<b>Max.</b>	7,0	6,2	-0,6	7,3	385,0	12,3	17,7	0,5	1,5	26,6	20,7	29,7	22,1	56,4	22,1	95,5	56,8
<b>n</b>	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Dp= Desvio padrão, Mín= mínimo; Máx.= máximo, CE= Condutividade elétrica, CTC= Capacidade de troca de cátions CO= Carbono orgânico, V= Saturação por bases, m= Saturação por Al



**FIGURA 14.** Valores médios de pH em água, pH em KCl e índice SMP do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2.

Ainda que os valores médios de pH em água dos solos construídos SA-24 e SA-2 são semelhantes (4,6 e 4,8, respectivamente), valores bem diferenciados podem ser observados ao longo dos perfis. Por exemplo no P2-2 e no P3-2, algumas camadas apresentam elevados valores de pH em água como 6,6, 7,0 e 6,8 (Apêndice 28). Estes valores, além de indicar a presença de materiais com potencial de neutralizar a acidez destes solos, igualmente demonstram a heterogeneidade dos materiais que compõem os solos construídos.

As camadas que apresentam pH em água mais baixo, principalmente nos solos construídos SA-24, indicam que os processos de oxidação da pirita foram mais intensos nesses locais.

Considerando os valores mínimo e máximo do pH em água para os solos construídos SA-24 e SA-2, constatou-se que os solos construídos SA-2 apresentam as maiores amplitudes de valores, indicando a grande variação do comportamento químico destes solos em comparação aos solos construídos SA-24, que apresentam maior constância.

Quanto ao solo natural, este apresenta um valor médio de pH 4,2, considerado como muito baixo pela Comissão de Fertilidade do Solo – RS/SC

(1994). Este valor é semelhante aos dos solos construídos, demonstrando que já o próprio solo natural ocorrente na área da mina apresenta condições químicas inadequadas para o desenvolvimento vegetal.

Na Tabela 3, são apresentados o pH em água e o pH em KCl, estabelecendo a diferença denominada  $\Delta$  pH (pH KCl - pH em água). Em geral tanto o solo natural como os solos construídos SA-24 e SA-2, apresentam valores de  $\Delta$  pH negativos, ou seja, as partículas destes solos possuem cargas líquidas negativas (Meurer et al., 2000).

Provavelmente íons como o Al e o Fe, que são liberados durante a dissolução de minerais, estão presentes em quantidades consideráveis e estão substituindo os íons  $H^+$  adsorvidos às partículas do solo carregadas negativamente, conseqüentemente aumentando a concentração e a atividade dos íons  $H^+$  na solução do solo. Este efeito adiciona-se aos  $H^+$  produzidos durante a oxidação da pirita (Pinto & Kämpf, 2002), tornando o pH do solo mais baixo.

Os solos construídos SA-2 apresentam um valor médio de  $\Delta$  pH mais baixo (-0,8) em comparação aos solos construídos SA-24 que apresentam um valor médio de  $\Delta$  pH mais alto (-1,1), significando a menor liberação de  $H^+$  na solução do solo através da substituição de íons adsorvidos pelas partículas do solo.

Os valores médios de pH e de  $\Delta$  pH mostram o progressivo avanço do processo de oxidação da pirita nos solos construídos SA-24, bem como o início deste processo nos solos construídos SA-2. Este fato também foi verificado na comparação das minas Butiá-Leste e Recreio, representadas por dois solos construídos de dois e quinze anos, respectivamente (Kämpf et al., 1997), assim como nas minas Juliana, do Apertado e Rio do Meio localizadas no Município de Lauro Müller, Santa Catarina (Campos et al., 2003).

Na Tabela 3 e Figura 14, observa-se o índice SMP que varia entre 3,3 e 7,3, com valores médios de 3,9, 4,7 e 5,3, respectivamente, para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2.

A acidez dos solos construídos SA-24 precisa ser corrigida através da aplicação de calcário em quantidades que variam de 9,6 a 13,3 t ha<sup>-1</sup> para atingir valores de pH em água de 5,5 a 6,0. Os solos construídos SA-2, que apresentam os índices médios mais altos de SMP, precisam das menores quantidades de aplicação de calcário, que vão de 4,8 a 7,5 t ha<sup>-1</sup>, demonstrando que estes solos

possuem ainda a capacidade natural de neutralizar a acidez. O solo natural destacou-se por precisar das maiores quantidades de calcário para atingir valores de pH entre 5,5 e 6,0, indicando o estado de deterioração química em que se encontra este solo pré-minerado. Embora as aplicações de calcário possam contribuir significativamente no desenvolvimento normal das espécies vegetais de cobertura, em condições de acidez extrema tornam-se onerosas e praticamente inviáveis.

Conforme observado na Tabela 3, a condutividade elétrica do extrato do solo (CE) variou de 9,6 a 385  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , com médias de 222,9, 101,0 e 240,6  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2.

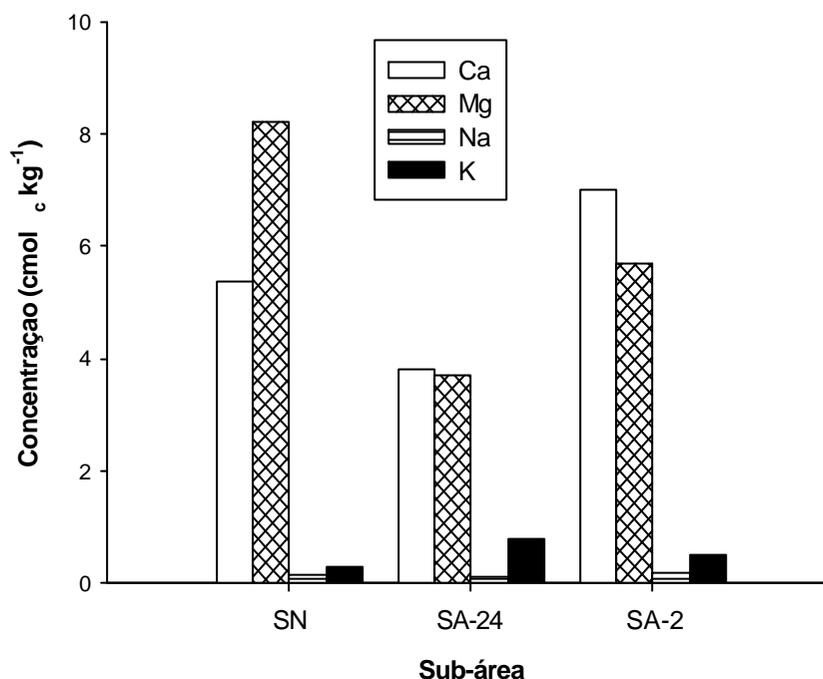
Segundo Oliveira (2001), solos com valores de CE entre 0 e 200  $\mu\text{S cm}^{-1}$  são classificados como não salinos e o seu efeito de salinidade sobre as plantas seria negligenciável, enquanto que solos com valores de CE entre 200 a 400  $\mu\text{S cm}^{-1}$  são classificados como ligeiramente salinos, onde culturas muito sensíveis à salinidade podem ter sua produtividade reduzida. Assim, pode-se inferir que os solos construídos SA-24 são considerados como não salinos, enquanto que o solo natural e os solos construídos SA-2 são considerados ligeiramente salinos, podendo afetar ou comprometer a etapa de desenvolvimento de algumas espécies vegetais menos toleráveis à salinidade.

Os solos construídos SA-2 apresentam maiores valores médios de CE em comparação aos solos construídos SA-24, provavelmente devendo-se à liberação de sais pelo efeito de oxidação da pirita, assim como da dissolução de certos minerais, intensificadas pelo processo de acidificação, que libera grandes quantidades de íons para a solução do solo, conseqüentemente aumentando a CE (Almeida, 1999; Kämpf et al., 2000).

Outro fator que pode contribuir para a variação da CE entre as duas sub-áreas é a maior quantidade de materiais contendo silte, presente em algumas camadas nos solos construídos SA-2, que geralmente possuem mais sais do que materiais arenosos, como foi observado por Andrews et al. (1998).

Os menores valores de CE nos solos construídos SA-24 sugere o gradativo esgotamento dessas fontes de sais ao longo do tempo (Ciolkosz et al., 1985), assim como a precipitação de minerais formados através de neogênese.

Na Tabela 3 e na Figura 15, observam-se as concentrações médias dos cátions trocáveis do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2, apresentando para o Ca uma amplitude de 0,5 a 12,3  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  com médias de 5,4, 3,8 e 7,0, respectivamente.



**FIGURA 15.** Médias das concentrações de Ca, Mg, Na e K no solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2.

O Mg apresenta uma variação de 0,3 a 17,7  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  com concentrações médias de 8,2, 3,7 e 5,7 para o solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

O Na e o K apresentam variações que vão de < 0,01 a 2,8  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  com médias de 0,1 e 0,3, 0,1 e 0,8 e 0,2 e 0,5  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  para o solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

A partir destes dados, verifica-se que os solos construídos SA-2 apresentam maiores concentrações médias de Ca e Mg, com predomínio de Ca, em comparação aos solos construídos SA-24. Estas maiores concentrações indicam, provavelmente, que nos solos construídos SA-2 existem carbonatos em processo de dissolução, liberando importantes quantidades de Ca e Mg, fato que foi igualmente comprovado num solo construído no sudeste do Estado de Virginia (EUA) por Haering et al. (1993).

Nos solos construídos SA-24, a contínua exposição de camadas contendo pirita a condições oxidantes favoreceu a oxidação deste sulfeto e a conseqüente lixiviação do Ca acompanhado do ânion sulfato. Segundo Campos et al (2003), este processo de lixiviação de cátions acompanhado do sulfato ácido não ocorreria apenas com o Ca, mas também com o Mg e o Na.

Bussler et al. (1984) determinaram através de pesquisas a campo as concentrações de alguns elementos que limitariam o desenvolvimento do pinus (*Pinus virginia* L.), estabelecendo para o K um nível crítico de  $0,13 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , considerando valores menores que este causadores de deficiência nutricional para o desenvolvimento normal da maioria das plantas.

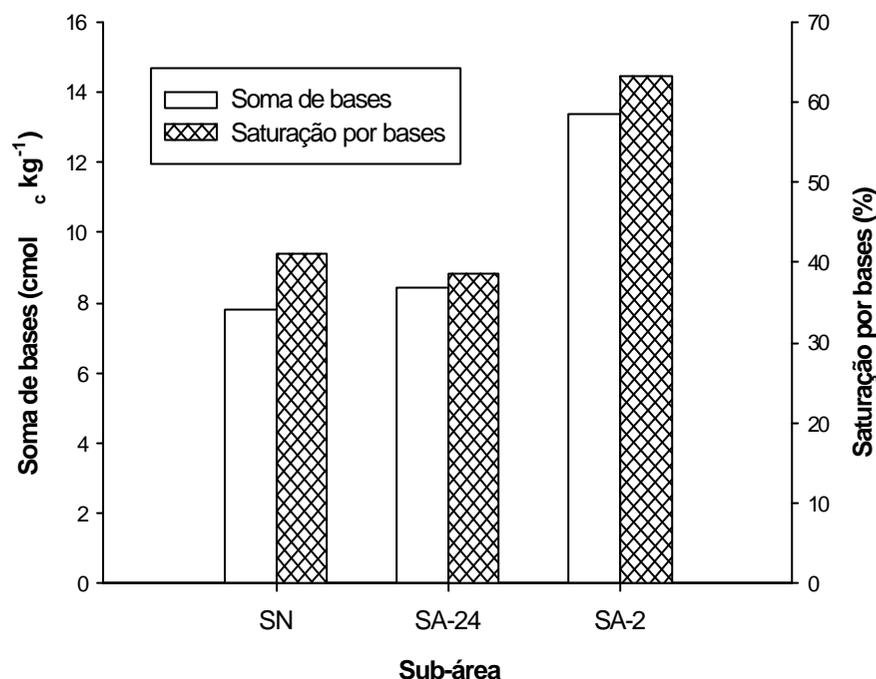
Observando os valores médios das concentrações de K, tanto no solo natural ( $0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) como nos solos construídos SA-24 ( $0,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) e solos construídos SA-2 ( $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), percebe-se que as três sub-áreas apresentam teores médios superiores ao nível limite estabelecido como tóxico para o desenvolvimento de algumas espécies vegetais.

Pitchel et al. (1994) demonstraram que os solos construídos tendem a ser deficientes em K com o passar do tempo, assim como igualmente poderia acontecer com o Ca e Mg, por causa dos intensos processos de intemperização de minerais e a conseqüente perda dos mesmos por lixiviação.

O Na apresenta baixas concentrações nos solos construídos SA-24 e SA-2. Isto deve-se à diminuição gradativa deste elemento com o decorrer do tempo, como foi constatado por Almeida (1999). Esta diminuição do Na acontece pela rápida dissolução inicial de silicatos, mica e feldspatos, que dão origem a novas fases minerais como a natrojarosita  $\text{NaFe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_6$ , ocasionando desta maneira a diminuição dos teores de Na nos solos construídos (Almeida, 1999). Nas áreas recentemente construídas, a rapidez com que acontecem os processos de dissolução, como a formação de novas fases minerais, pode estar relacionada à formação de grandes macroporos, resultantes dos distúrbios sofridos pelo solo durante os processos de mineração (Haering et al., 1993).

Outras duas características que tem estrita relação com as concentrações das bases trocáveis são a soma de bases (S) e a saturação por bases (V), como podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 16. O solo natural e os solos construídos SA-24 e SA-2 apresentam uma S com amplitude de variação de 1,1 a  $26,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  com médias de 14,0, 8,4 e  $13,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,

respectivamente, enquanto que a  $V$  apresenta variações de 3,7 a 95,5 % e médias de 41,0, 38,7 e 63,2%, respectivamente para o solo natural e os solos construídos SA-24 e SA-2.



**FIGURA 16.** Valores médios da soma de bases (S) e saturação por bases (V) do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2.

Isto evidencia que as perdas por lixiviação e deslocamento dos cátions básicos nos solos construídos SA-24 são influenciadas pela quantidade de  $Al^{+3}$  e  $H^{+}$  trocáveis presentes nos locais de troca que estão substituindo as bases trocáveis.

Embora tanto os solos construídos SA-24 como os SA-2 apresentem altos valores médios de S (Comissão de Fertilidade do Solo – RS/SC, 1994), nos solos SA-2 este valor é bastante superior em comparação aos solos SA-24, demonstrando a existência de uma maior quantidade de cátions trocáveis sendo liberados pelos processos de acidificação e dissolução de certos minerais nos solos construídos SA-2 e a expressiva perda por lixiviação e deslocamento destes nos solos construídos SA-24.

Na grande maioria das camadas, tanto nos solos construídos SA-24 como nos solos construídos SA-2, a  $V$  não tem uma relação linear com o pH do solo, como acontece normalmente com a maioria dos solos naturais. Existem camadas com valores de pH muito baixo apresentando maiores valores de  $V$  em

comparação àquelas que apresentam valores de pH mais alto, tendo esta situação, na maioria das vezes, relação com a grande quantidade de Ca e Mg presentes em tais camadas. Este fato deve-se à presença de materiais pouco intemperizados e de fácil dissolução nos solos construídos, como os carbonatos, contribuindo significativamente para o excesso de Ca e Mg no sistema, fato que foi igualmente observado por Kämpf et al. (2000) nas minas Butiá-Leste e Recreio.

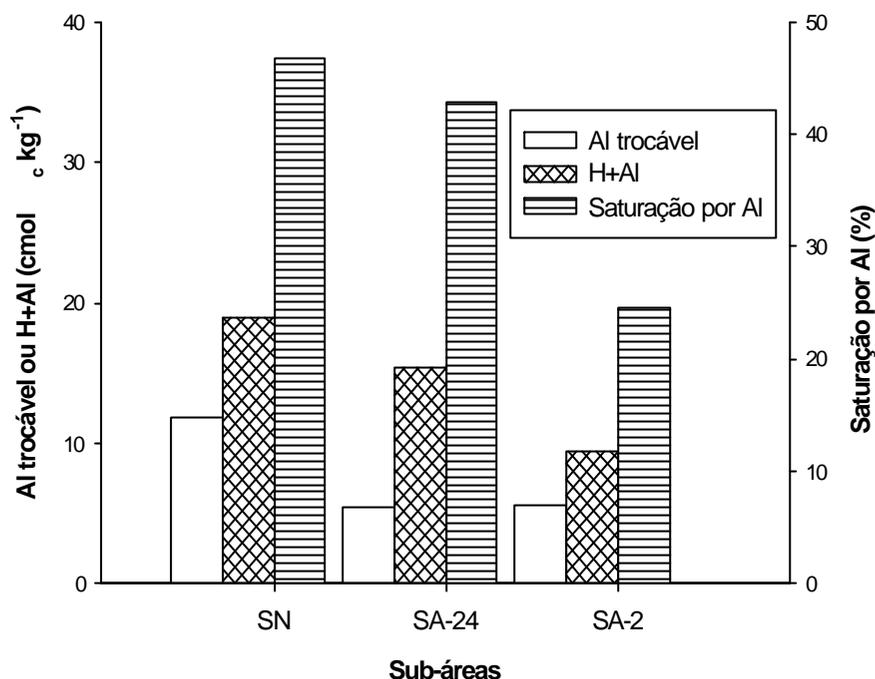
Os teores de Al trocável variam de 0,0 a 20,7  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  com valores médios de 11,8, 5,5 e 5,6 para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente (Tabela 3 e na Figura 17). Tanto nos solos construídos SA-24 como nos solos SA-2, as concentrações são consideradas tóxicas para o desenvolvimento de várias espécies vegetais. Estes altos teores de Al trocável evidenciam a intemperização dos argilominerais devido à ação do ácido sulfúrico originado durante a oxidação da pirita e a conseqüente liberação dos cátions estruturais. Isto pode ser confirmado pela presença de altos teores de Mg e de Fe na maioria destes solos.

Cabe salientar que o material estéril apresenta altos teores de Al trocável (Apêndice 29), demonstrando que parte dos altos teores de Al trocável expressado nas análises químicas dos solos construídos pode proceder do próprio material de origem.

Embora os teores médios de Al trocável sejam semelhantes nos solos construídos SA-24 e SA-2, existe uma grande diferença nos valores de saturação por Al entre estes solos, que apresentam valores médios de 42,9% e 24,5%, respectivamente, (Tabela 3 e na Figura 17). Isto provavelmente se deve a baixa mobilidade do Al em comparação às bases trocáveis, que faz que o Al ocupe os locais de troca superficial destes solos, substituindo os cátions básicos que foram lixiviados nos solos construídos SA-24.

Este mesmo efeito pode ser observado nas camadas superficiais dos solos construídos SA-2 devido à intensa exposição destas às condições ambientais que favorecem o aceleração dos processos químicos que conduzem ou originam esta situação. Já no caso das camadas subsuperficiais dos mesmos perfis, este fenômeno não é observado, justamente pela quase ausência de condições ambientais favoráveis, especificamente água e ar, que

possam acelerar estes processos químicos, levando inclusive a situações onde o Al e a saturação por Al apresentam valores nulos (Apêndice 28).



**FIGURA 17.** Valores médios de Al trocável, H+Al e saturação por Al no solo natural, solos construídos SA-24 e solos construídos SA-2.

Soares et al. (2002), num trabalho realizado com material proveniente das minas de Candiota-RS, confirmaram que o aumento da compactação acelera as taxas das reações produtoras de alcalinidade, ao mesmo tempo retardando a cinética das reações produtoras de acidez. Estes resultados podem ajudar a compreender melhor porque as camadas sub-superficiais apresentam baixos teores de Al e saturação por Al.

Quanto ao solo natural, destacam-se os altos teores médios de Al trocável (11,8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), que demonstram uma vez mais o grau de degradação química que sofrem tais solos expostos à atividade mineradora. A causa deste fato seria a possível utilização prévia da área onde está localizado o perfil avaliado como depósito temporário de materiais estéreis. Nesta situação, a exposição da pirita a condições oxidantes torna-se inevitável, ocasionando, conseqüentemente, a contaminação do solo natural através da infiltração dos lixiviados produzidos pela oxidação deste sulfeto.

A relação entre o Al trocável e a acidez potencial (H+Al) é bastante informativa (Tabela 3). Os cátions trocáveis Al<sup>3+</sup> e H<sup>+</sup> são fontes de acidez do solo

sendo que o  $H^+$  representa menos do que 5% da acidez potencial (H+Al) (Meurer et al., 2002; Sparks, 1995; SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 1989). Comparando-se os teores médios de Al e os valores médios da H+Al do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2, verifica-se que existe uma diferença superior a 5% entre estes valores, demonstrando que ocorrem outros materiais ou elementos desconhecidos, que estão contribuindo significativamente com o aumento da acidez potencial. Este mesmo comportamento da acidez potencial foi observado por Campos et al. (2003), em vários solos construídos no Município de Lauro Muller, SC. A partir desta inferência, sugere-se em geral a utilização do termo “acidez potencial” e não do termo “Al trocável” quando referindo-se a esta propriedade dos solos construídos, já que existiriam outros elementos, além do Al, contribuindo com a acidez potencial.

O solo natural e os solos construídos SA-24 e SA-2 apresentam uma variação da CTC efetiva de <0,01 a 38,8  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  com médias de 15,5, 13,9 e 19,0  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , respectivamente, enquanto que a  $\text{CTC}_{\text{pH}7}$  apresenta uma variação de 10,0 a 79,2  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  com médias de 33,3, 23,7 e 22,8  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , respectivamente, como pode ser observado na Tabela 3 e na Figura 18.

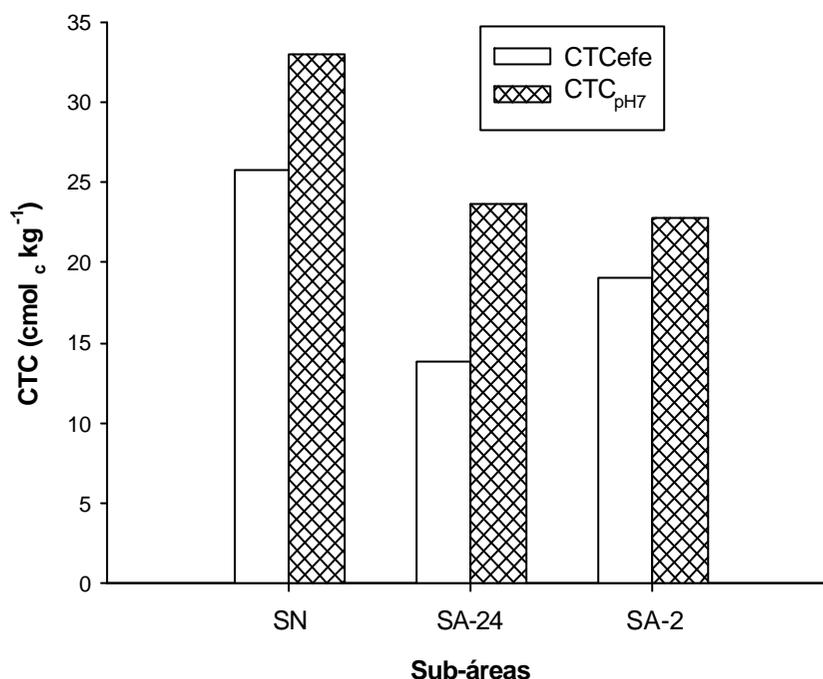
Os maiores valores de CTC efetiva nos solos construídos SA-2 confirmam que estes solos possuem uma maior quantidade de bases trocáveis, conseqüência da liberação de cátions básicos pelo efeito de dissolução de alguns minerais em comparação aos solos construídos SA-24 e ao próprio solo natural.

A diferença entre os valores da CTC efetiva dos solos construídos SA-24 e SA-2 pode também estar influenciada pela presença de certos tipos de argilas, especialmente esmectitas, que estariam contribuindo com o aumento da CTC efetiva dos solos construídos, como foi identificado por Karathanasis et al. (1988).

Baseado na comparação dos valores da CTC efetiva e da S pode-se inferir que o cátion dominante da fase trocável nos solos construídos SA-24 é o Al, enquanto que nos solos construídos SA-2 este domínio está compartilhado com o cátion Ca.

Quanto ao solo natural, os maiores valores da CTC efetiva em comparação aos solos construídos podem estar influenciados pelas altas

concentrações de Ca e Mg que este apresenta, enquanto que os altos valores da  $CTC_{pH7}$  podem dever-se aos altos valores de acidez trocável.



**FIGURA 18.** CTC efetiva e CTC a pH7 do solo natural e dos solos construídos SA-24 e SA-2.

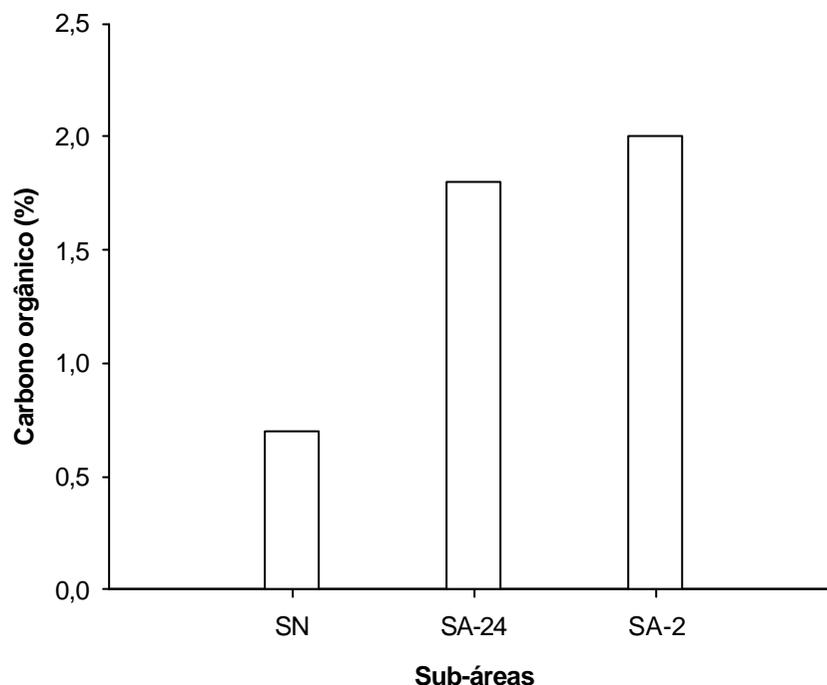
Os teores de carbono orgânico (CO) apresentam valores de <0,01 a 22,1%, com médias de 0,9%, 1,8% e 2,0% para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 3 e na Figura 19.

A distribuição do CO apresenta-se em forma irregular com a profundidade dos perfis, estando fortemente relacionada à alternância de camadas com folhelhos carbonosos ou contendo rejeitos de carvão com camadas menos carbonosas, utilizadas para o preenchimento das cavas mineradas.

Nos solos construídos SA-24, embora existam pequenas camadas superficiais de material orgânico em decomposição, estas aparentemente não contribuem com o enriquecimento das camadas superficiais e subsuperficiais destes solos.

A partir da análise comparativa das propriedades químicas dos solos construídos, infere-se que, tanto os SA-24 como os SA-2, apresentam feições de sulfurização ativa, evidenciadas pelos baixos valores de pH encontrados por

algumas camadas, constituindo-se o processo de sulfurização, como o principal elemento da evolução pedogenética destes solos.



**FIGURA 19.** Teor médio de CO no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2.

As mudanças mais significativas que acompanham o intemperismo ácido sulfatado, representadas pelo decréscimo de pH e dos cátions básicos e pelo aumento da CE, do  $\text{SO}_4$  solúvel e da acidez potencial, conduzem à formação de novas fases minerais que contribuem na atribuição de características e propriedades particulares dos solos construídos.

Existem indícios suficientes para afirmar que os solos construídos SA-2 encontram-se numa etapa de evolução incipiente em comparação os solos construídos SA-24 e que o grau de acidificação dos mesmos ainda não é acentuado, mas que precisa ser administrado adequadamente para evitar danos ambientais de maior intensidade ao longo do tempo.

Os resultados das análises químicas discutidos neste trabalho indicam que o solo natural tem um alto grau de contaminação, em consequência da oxidação de sulfetos presentes nos materiais estéreis que foram depositados temporalmente na superfície deste solo, através da infiltração dos produtos desta oxidação (drenagem ácida).

Esta contaminação faz com que o solo natural perca sua condição de referência como representante da unidade de mapeamento, embora continua representando os solos ocorrentes na área da Mina. Este diagnóstico de contaminação indica que as camadas superficiais dos solos construídos responsáveis pelo sustento da vegetação de cobertura estão constituindo-se por materiais intensamente degradados quimicamente, podendo comprometer desde o início o desenvolvimento da vegetação e a satisfatória recuperação destas áreas a longo prazo.

#### 4.3.1 Estágios de intemperização

Os teores totais dos elementos Fe, Al, Mn, Ti, Si e P foram determinados através do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997), onde a solubilização das amostras é realizada com solução de  $H_2SO_4$  1:1, permitindo as determinações das relações moleculares  $K_i$  e  $K_r$  e a avaliação dos estágios de intemperização das mesmas.

A utilização de ácido sulfúrico como solução extratora, com tal força iônica, pressupõe a dissolução restrita a minerais secundários (argilominerais), indicando que os teores dos elementos analisados são próximos aos da fração coloidal das amostras analisadas.

Os elementos apresentados foram determinados como elementos totais e expressados como óxidos facilitando as determinações das relações moleculares  $K_i$  e  $K_r$ .

Na Tabela 4, são apresentadas as concentrações médias dos elementos determinados no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2.

As concentrações de Fe expressas como  $Fe_2O_3$  apresentam uma amplitude de variação de 15,7 a 112,5  $g\ kg^{-1}$  com médias de 78,7, 52,2 e 45,0  $g\ kg^{-1}$  para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente, enquanto que os teores de Al expressos como  $Al_2O_3$  apresentam uma variação de 37,6 a 197,0  $g\ kg^{-1}$  e médias de 113,1; 151,6 e 130,4  $g\ kg^{-1}$  no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

Os teores de Mn expressos como MnO, permanecem invariáveis nas três distintas sub-áreas apresentando um valor médio de 0,1  $g\ kg^{-1}$ , enquanto que os teores de Ti expressos como  $TiO_2$  apresentam uma amplitude de variação de

3,5 a 11,3 g kg<sup>-1</sup> com médias de 4,8, 6,4 e 5,4 g kg<sup>-1</sup> para o solo natural e os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

**TABELA 4.** Elementos químicos determinados no solo natural e nos solos construídos SA-24 e SA-2

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S-SO <sub>4</sub>	Ki	Kr
	-----g kg <sup>-1</sup> -----						mg kg <sup>-1</sup>		
<b>Solo Natural</b>									
<b>Média</b>	78,7	113,1	0,1	4,8	249,6	0,5	228,6	4,1	2,8
<b>Dp</b>	29,3	42,8	0,1	0,9	61,0	0,2	51,1	1,3	0,7
<b>Mín.</b>	25,7	37,6	<0,01	3,5	114,8	0,2	69,6	3,1	2,0
<b>Max.</b>	112,5	149,4	0,1	6,7	320,7	0,8	293,6	6,4	4,0
<b>n</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Solos Construídos SA-24</b>									
<b>Média</b>	52,2	151,6	0,1	6,4	286,2	0,8	168,7	3,3	2,7
<b>Dp</b>	26,0	35,2	0,1	1,7	68,4	0,4	147,2	1,0	0,9
<b>Mín.</b>	16,0	72,9	<0,01	3,9	163,5	0,3	<0,01	2,4	1,7
<b>Máx.</b>	98,8	197,0	0,3	11,3	409,0	1,6	512,2	6,6	5,7
<b>n</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<b>Solos Construídos SA-2</b>									
<b>Média</b>	45,0	130,4	0,1	5,4	274,0	0,4	376,9	3,6	2,9
<b>Dp</b>	17,5	29,9	0,1	1,0	63,8	0,2	155,0	0,8	0,7
<b>Mín.</b>	15,7	71,8	<0,01	4,1	112,4	<0,01	38,3	2,6	1,9
<b>Máx.</b>	82,8	180,3	0,3	7,1	351,2	0,8	605,3	5,5	4,4
<b>n</b>	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Dp= Desvio Padrão; Mín.= mínimo; Máx.= máximo

As concentrações de Si expressadas como SiO<sub>2</sub> apresentam uma variação de 112,4 a 409,0 g kg<sup>-1</sup> com concentrações médias de 249,6, 286,2 e 274,0 g kg<sup>-1</sup> para o solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

Os teores de P expressos como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> apresentam uma variação de <0,01 a 1,6 g kg<sup>-1</sup> e médias de 0,5, 0,8 e 0,4 g kg<sup>-1</sup> para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente, enquanto que os teores de S expressos como SO<sub>4</sub> apresentam uma variação de <0,01 a 605,3 mg kg<sup>-1</sup> com médias de 228,6, 168,7 e 376,9 mg kg<sup>-1</sup> para o solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente.

O solo natural apresenta maiores concentrações médias de Fe em comparação aos solos construídos SA-24 e SA-2, provavelmente devido à presença de horizontes subjacentes a partir dos 47 cm de profundidade, que expõem grandes quantidades de plintita. A formação da plintita envolve a segregação de ferro causada pela alternância dos processos de redução e

oxidação (Oliveira, 2001), incidindo significativamente na quantidade de ferro presente em nesses horizontes do solo.

Os solos construídos SA-24 apresentam maiores concentrações médias de Fe em comparação aos solos construídos SA-2, devendo-se provavelmente ao avançado estado de oxidação da pirita nos solos construídos SA-24, assim como a um estado incipiente deste processo nos solos construídos SA-2.

Os solos construídos SA-24 apresentam maiores teores de Al, em comparação aos solos construídos SA-2, da mesma maneira como foi observado com o Fe, confirmando que os solos construídos SA-24 manifestam um estado mais avançado de oxidação da pirita, assim como do processo de sulfurização. Estes resultados demonstram que o Al liberado durante a intemperização dos minerais secundários permanece no sistema, facilitado pela baixa mobilidade do mesmo.

O Ti apresenta o mesmo comportamento que o Al e o Fe, com maiores teores nos solos construídos SA-24 em comparação aos solos construídos SA-2. A permanência do Ti no sistema vê-se influenciada, da mesma forma que o Al, pela sua baixa mobilidade.

O Si apresenta em média maiores teores nos solos construídos SA-24. As médias dos teores de Si nas sub-áreas de solos construídos, não diferem grandemente, como acontece com as médias dos demais elementos, fato que pode estar influenciado pela perda do Si, devido à mobilidade que apresenta este elemento no perfil, em comparação aos demais.

A partir dos teores de  $\text{SO}_4$  pode-se verificar que as concentrações de S nos solos construídos SA-2 ( $376,9 \text{ g kg}^{-1}$ ) são em média superiores aos teores dos solos construídos SA-24 ( $168,7 \text{ g kg}^{-1}$ ). Esta diferença demonstra claramente que a pirita, representada pelas concentrações de  $\text{SO}_4$ , vai oxidando-se ao longo do tempo, diminuindo consideravelmente seus teores e, ao mesmo tempo, o seu potencial de acidificação.

O índice Ki serve para indicar a relação molar que existe entre  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  da fração argila do solo. Este índice foi utilizado em vários sistemas de classificação para identificar horizontes diagnósticos e/ou discriminar solos bastante intemperizados das regiões tropicais. Este tem sido empregado juntamente com outras relações molares como índice de intemperismo. Quanto

mais intemperizado o solo, menor o índice. Solos muito intemperizados com argila de atividade muito baixa apresentam os mais baixos valores de  $K_i$  encontrados em solos brasileiros (Oliveira, 2001). Solos com  $K_i$  entre 1 e 2 são predominantemente de baixa atividade coloidal enquanto que  $K_i$  na ordem de 2,5-3,0 indica presença significativa de minerais de argila 2:1 (esmectitas). Valores de  $K_i$  superiores a 4,5 indicam a predominância absoluta de minerais de argila de atividade alta (esmectitas) na fração argila (Oliveira, 2001).

Quanto ao  $K_r$ , este representa a relação molecular  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  e é utilizado para separar solos caulíníticos e oxídicos (EMBRAPA, 1999). Se o  $K_r$  é maior que 0,75, estes solos são predominantemente caulíníticos, enquanto que se o  $K_r$  é menor que 0,75 estes solos são predominantemente oxídicos. Na Tabela 4 e na Figura 20 podem ser observados os valores das médias de  $K_i$  e  $K_r$  do solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2.

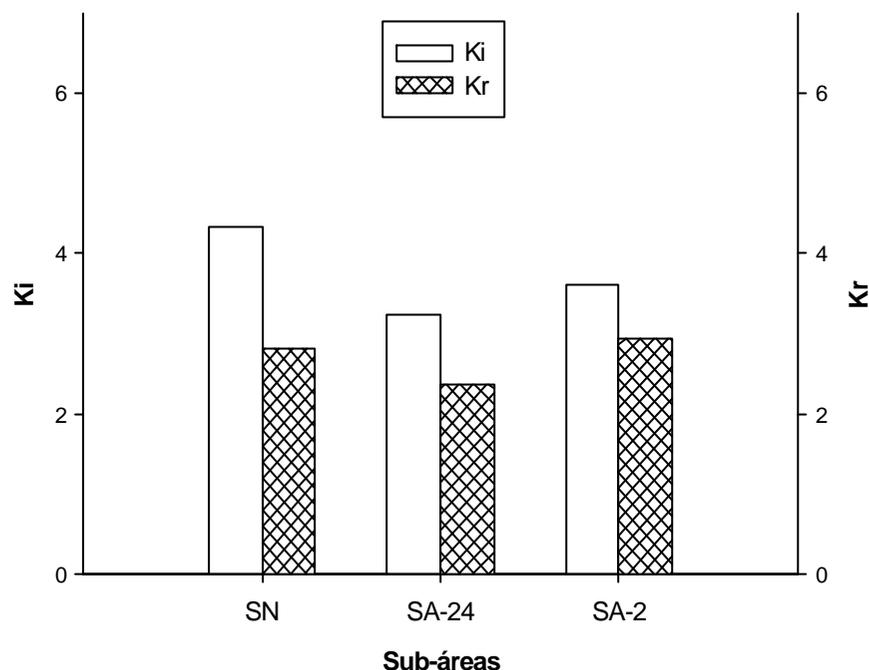
O  $K_i$  apresenta variação de 2,4 a 6,6, com médias de 4,1, 3,3 e 3,6 para o solo natural e solos construídos SA-24 e SA-2, enquanto que o  $K_r$  apresenta uma amplitude de variação de 1,7 a 5,7 com médias de 2,8, 2,7 e 2,9 para o solo natural e para os solos construídos SA-24 e SA-2.

Os solos construídos SA-24 apresentam em geral valores menores médios de  $K_i$  em comparação aos solos construídos SA-2, indicando que estes solos possuem um maior grau de intemperização pela ação do ácido sulfúrico proveniente da oxidação da pirita.

Quanto ao solo natural observa-se um valor médio bastante alto de  $K_i$  (4,1). Segundo Oliveira (2001), este valor indicaria a predominância de minerais de argila de atividade muito alta (esmectitas) na fração coloidal desta camada, o que resultaria numa CTC próxima ou acima de  $100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Observando no apêndice 26 os dados da CTC dos horizontes B e Bf1 e seus respectivos teores de argila (apêndice 9), confere-se que as argilas presentes nestas camadas são de atividade alta, concedendo-lhes valores de CTC da fração argila por cima de  $60 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Apesar da maioria dos valores de  $K_i$  encontrados nos boletins de levantamento de solos efetuados no Brasil aparentemente confirmarem a pressuposição que o extrato sulfúrico dissolve apenas os minerais secundários, existem dados que apontam o contrário (Oliveira, 2001). Num gleissolo sálico, o valor de  $K_i$  também foi incompatível com o valor da CTC. Tais dados apontam

para possíveis inconsistências do método quando se trata de material com pouca quantidade de argila (Oliveira, 2001).



**FIGURA 20.** Médias dos valores das relações moleculares Ki e Kr dos solos naturais e solos construídos SA-24 e SA-2.

Quanto ao Kr, tanto o solo natural como os solos construídos SA-24 e SA-2 apresentam valores médios acima de 0,75 indicando a suas condições de caulínícos e não de oxídicos (EMBRAPA, 1999).

Os dados apresentados na Tabela 3 (seção 4.3) e na Tabela 4 confirmam a segunda hipótese, que estabelece que o entendimento dos processos químicos e pedogenéticos ocorrentes nos solos construídos e a aplicação dos seus princípios ao correto planejamento permite a melhoria da qualidade destes solos.

#### 4.3.2 Potenciais de acidificação e neutralização

Os potenciais de acidificação e neutralização foram determinados por métodos denominados de estáticos. Estes métodos buscam determinar o potencial de acidificação (PA) e o potencial de neutralização (PN), não fornecendo suas taxas de liberação (Seção 2.6).

Na tabela 5 são apresentadas as estimativas dos PA e PN dos materiais da coluna geológica.

**TABELA 5.** Estimativas do potencial de acidificação (PA) e do potencial de neutralização (PN) das camadas da coluna geológica

<b>Camada</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>	<b>PN-PA</b>	<b>PN/PA</b>
	<b>-----kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>-----</b>			
<b>Coluna Geológica</b>				
C1	3,3	6,7	3,4	2,0
C2	3,2	6,7	3,5	2,1
C3	3,5	1,5	-2,0	0,4
C4	18,2	7,8	-10,4	0,4
C5	27,5	13,2	-14,3	0,5
C6	5,5	13,1	7,6	2,4
C7	3,4	17,0	13,6	5,1
C8	5,4	34,6	29,2	6,5
C9	3,4	44,3	40,9	13,1

PA= potencial de acidificação; PN= potencial de neutralização

Entre os valores estimativos do PA dos materiais da coluna geológica destacam-se as camadas C4 e C5 com valores de 18,2 e 27,5 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, respectivamente. Estas camadas apresentam valores altos de PA em comparação aos seus respectivos valores de PN, indicando que o potencial líquido de neutralização é negativo. Estas camadas constituem-se nas únicas da coluna geológica com um elevado potencial acidificante, com exceção da camada C3, que também apresenta um potencial líquido de neutralização negativo, mas não possui uma diferença muito grande entre seus potenciais, como as camadas C4 e C5. As camadas C7, C8 e C9, ao contrário das anteriores, apresentam baixos valores de PA e altos valores de PN, com razões PN/PA superiores a três, expressando seus altos potenciais de alcalinidade ao longo do tempo. As camadas C1, C2 e C6, caem naquela faixa de incerteza estabelecida para amostras com valores de *NNP* entre -20 e 20 ou razões entre 1:1 e 3:1 que precisam de outros tipos de análises para sua melhor interpretação. Por outro lado, as camadas C8 e C9 destacam-se pelos altos valores de PN que apresentam 34,6 e 44,3 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, respectivamente, indicando a presença de carbonatos em quantidades significativas para a neutralização da acidez produzida pela oxidação da pirita, nessas camadas, ao longo do tempo.

Os critérios sobre as diferenças entre esses potenciais (PN-PA) ou sobre razões (PN/PA) (seção 2.6), para a determinação e predição da geração da acidez, foram estabelecidos pela agência de proteção ambiental dos EUA – EPA (*Environmental Protection Agency*).

Esta metodologia apresenta vários pontos sujeitos a críticas, já que não considera as diferenças entre a taxa de oxidação da pirita e a de dissolução dos carbonatos, e assume que a oxidação completa da pirita ocorre nas condições naturais (Pinto, 1997). Além disso, existe uma restrição à aplicação dos critérios estabelecidos pela EPA para a determinação e predição da acidez no presente estudo, que é a diferença de metodologia utilizada para a obtenção do potencial de acidificação. Estes critérios foram estabelecidos para testes como o “*Acid Base Accounting*” (ABA), que utilizam a estimativa a partir do teor de enxofre total e não do S da pirita, que superestima o PA em relação ao método do peróxido.

Apesar das restrições apresentadas, tanto metodologicamente como na determinação e predição da acidez, esta técnica continua sendo aplicada na atualidade com sucesso em áreas de mineração de carvão (Pinto, 1997; Kämpf et al., 2000; Corrêa, 2002).

Conforme estabelecido pela EPA, para a predição da geração da acidez são utilizados o potencial líquido de neutralização (“*Net Neutralization Potencial*”, *NNP*) ( $NNP=PN-PA$  ou  $NNP=PN/PA$ ). Amostras com *NNP* menores a zero ou razões menores que um serão geradoras de ácido; amostras com *NNP* entre -20 e 20 ou razões entre 1:1 e 3:1 caem em uma zona de incerteza, recomendando-se outros testes, como os cinéticos para sua determinação (EUA, 1994). Usualmente são adotados os critérios de razão PN/PA maiores a 2,5 –3,0 para a não geração de acidez das amostras (Pinto, 1997).

Os dados da Tabela 5 confirmam a segunda hipótese, que estabelece que o conhecimento das propriedades químicas dos materiais da coluna geológica permite melhorar as características dos solos construídos através da seleção dos materiais a serem utilizados no processo de construção das áreas mineradas.

A partir da avaliação destes dados, pode-se classificar as camadas pertencentes à coluna geológica e separar estas de acordo ao potencial líquido de neutralização que produzirão, podendo ser positivo o negativo. Sendo o mesmo negativo, estas camadas deverão ser colocadas na parte mais profunda das cavas mineradas no momento da construção, de forma a ficarem isoladas de condições ambientais propícias para sua oxidação, passando a constituir, uma vez depositadas, as camadas subsuperficiais dos novos solos construídos. Enquanto que sendo o potencial líquido de neutralização positivo, estas camadas

poderão ser depositadas por cima, permitindo sua drenagem a neutralização da acidez das camadas de abaixo.

Esta classificação e separação dos materiais da coluna geológica deve fazer parte do planejamento pré-mineração, fato que ajudará à correta disposição final destes materiais a fim de evitar a exposição dos materiais contendo sulfeto a condições que favoreçam a oxidação dos mesmos e a produção da DAM com conseqüências negativas para o meio ambiente.

Na Tabela 6, são apresentados os valores estimados médios do PA e PN dos materiais da coluna geológica e dos solos construídos das sub-áreas SA-24 e SA-2.

O PA apresenta uma variação de 0,9 a 27,3 kg  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  com médias de 8,1, 1,5 e 6,4  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  para a coluna geológica e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente, demonstrando que o sulfeto presente nestes solos vai-se oxidando gradativamente a partir da exposição dos mesmos a condições ambientais favoráveis, como água e ar.

Quanto ao PA dos solos construídos SA-24, esperavam-se valores mais altos, já que em 24 anos dificilmente as fontes de sulfetos possam praticamente esgotar-se em solos construídos. A diminuição drástica de sulfetos pode acontecer em condições ambientais muito propícias, por exemplo quando o pH atinge valores de 2,8 ou 3,2, onde existem bactérias catalisadoras capazes de acelerar os processos de oxidação da pirita. Este não é o caso dos solos construídos SA-24, já que os mesmos apresentam um pH mínimo de 3,7 e uma média de 4,6, além de ter restrições nas camadas subsuperficiais de água e ar que limitam ainda mais a oxidação e o progressivo esgotamento dos sulfetos.

Por outro lado, embora a metodologia do peróxido seja a mais utilizada na atualidade, esta apresenta certas restrições, conforme foi comentado anteriormente, o que dificulta ter certeza absoluta dos resultados obtidos, recomendando-se a utilização de outras análises paralelas para certificar os resultados do peróxido.

O PN apresenta uma variação de 1,2 a 44,3 kg  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  com médias de 16,1, 7,0 e 12,4  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  para a coluna geológica e para os solos construídos SA-24 e SA-2, respectivamente, demonstrando igualmente que com o tempo os carbonatos vão-se dissolvendo pela influência dos processos de acidificação destes solos (Apêndices 34 e 35).

**TABELA 6.** Estimativas médias do PA e PN da coluna geológica e dos solos construídos SA-24 e SA-2

	PA	PN	PN-PA	PN/PA
	-----kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> -----			
<b>Coluna Geológica</b>				
<b>Média</b>	8,1	16,1	8,0	3,6
<b>Desvio padrão</b>	8,6	14,2	17,8	4,0
<b>Mínimo</b>	2,9	1,5	-14,1	0,4
<b>Máximo</b>	27,3	44,3	40,8	12,7
<b>n</b>	9	9	9	9
<b>Solos Construídos SA-24</b>				
<b>Média</b>	1,5	7,0	5,4	5,2
<b>Desvio padrão</b>	1,0	5,1	5,0	4,3
<b>Mínimo</b>	0,9	1,2	0,3	1,4
<b>Máximo</b>	4,4	18,5	17,3	15,9
<b>n</b>	10	10	10	10
<b>Solos Construídos SA-2</b>				
<b>Média</b>	6,4	12,4	6,0	2,8
<b>Desvio padrão</b>	4,0	2,5	4,0	1,7
<b>Mínimo</b>	1,4	8,2	-1,7	0,8
<b>Máximo</b>	14,2	16,0	11,3	6,0
<b>n</b>	11	11	11	11

PA= potencial de acidificação; PN= potencial de neutralização.

As estimativas do potencial de neutralização têm sido bastante criticadas, principalmente, 1) pela utilização de ácidos fortes que podem dissolver minerais que não iriam reagir naturalmente da mesma forma, mantendo o pH das águas dentro de uma faixa aceitável (>5,5). Outros aspectos criticados são: 2) a fervura do ácido que incluiria os carbonatos de Mg e de Fe, superestimando o PN, e 3) a precipitação de hidróxidos de metais durante a titulação com NaOH, levando a subestimar o PN (Pinto, 1997).

Segundo Pinto (1997), os pontos (1) e (2) podem ser rebatidos. Em relação ao primeiro pode-se levantar dois aspectos, que o uso de ácidos fortes não deveria considerar-se uma desvantagem, já que a acidez produzida pela pirita não é fraca, assim como também não somente os carbonatos, mas também óxidos e hidróxidos de Ca, Mg e Al, fosfatos e silicatos pouco resistentes podem também neutralizar a acidez gerada.

Em relação ao ponto (2), existe o argumento de que os carbonatos de Fe não deveriam ser descartados do PN, pois após o consumo da calcita (carbonato de Ca) o pH pode ser tamponado entre 5,1 e 6,0 pela dissolução da

siderita (carbonato de Fe), o que não pode ser desconsiderado como aceitável (Pinto, 1997).

Sendo possível então considerar como aceitável uma certa neutralização do ácido por parte de silicatos e outros minerais mais solúveis, deveria ser procurado o limite a partir do qual a solubilização passasse a se estender aos minerais mais resistentes, que não seriam solubilizados pelo sistema ácido sulfatado dentro do período em que esse atuasse, que é relativamente curto em termos de tempo pedológico. Isso significa que a intensidade da atuação do ácido deve ser ponderada, restringindo o seu efeito de solubilização apenas aos carbonatos e aos minerais mais solúveis (Pinto, 1997).

Analisando em detalhe, embora existam alguns problemas metodológicos na determinação dos potenciais de acidificação e neutralização, estes não desqualificam os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados dos PA e PN da coluna geológica demonstram que existem camadas (C4 e C5) que têm um alto PA e baixo PN, resultando em valores negativos de potencial líquido de neutralização. Estas camadas são consideradas potenciais produtoras de DAM, devendo-se ter cuidado na disposição final destas na construção dos solos construídos. Para tanto, recomenda-se a utilização destes materiais para cobrir o subsolo e situar os materiais com potencial líquido de neutralização positivos na superfície, a fim de evitar a exposição das camadas com alto conteúdo de pirita a condições propícias para sua oxidação.

As determinações do PA, PN e do potencial líquido de neutralização da coluna geológica ajudam no planejamento pré-mineração e na construção de solos com maiores possibilidades de um rápido estabelecimento da vegetação de cobertura, o que evitará posteriores danos ambientais.

Por outro lado, a determinação dos PA e PN dos solos construídos SA-24 indica a possibilidade de estes solos encontram-se num estado mais avançado de intemperização, caracterizados pela diminuição do conteúdo de pirita e dos carbonatos presentes neles, em comparação aos solos construídos SA-2 que encontram-se numa etapa inicial de intemperização.

## 5. CONCLUSÕES

As diferenças existentes entre os perfis das duas sub-áreas de solos construídos originam-se, basicamente, pela utilização de diferentes materiais geológicos e diferentes processos de construção, sendo que suas influências sobrepõem-se aos processos pedogenéticos tradicionais de formação dos solos. Estas variações, principalmente a heterogeneidade dos materiais, refletem-se nas características químicas e físicas dos solos construídos e demonstram a importância da ação antrópica sobre os mesmos.

As características físicas dos solos construídos de diferentes idades demonstram que estes solos apresentam sérias limitações físicas para o desenvolvimento normal da vegetação de cobertura, influenciando negativamente no futuro dos mesmos. Adicionalmente, o alto grau de compactação dos solos construídos é afetado pelo uso de materiais predominantemente de textura argilosa na sua construção que, quando pressionados pelos equipamentos, mais facilmente deformam-se. Esta compactação dos solos construídos diminui a condutividade hidráulica saturada, assim como a infiltração de água no perfil do solo, originando problemas de erosão hídrica dos materiais superficiais e expondo as camadas subjacentes dos solos construídos, o que intensifica a acidificação destes solos.

A caracterização química dos solos construídos ajuda a compreender certos processos químicos originados pela oxidação da pirita. A evolução temporal destes solos está fortemente caracterizada pela intemperização ácido-sulfatada, o que pode ser percebido claramente através do pH,  $\Delta$ pH, CE, Ca, Mg, Al, entre outros.

Os solos construídos SA-24 evidenciam um estado mais avançado de evolução pedogenética em comparação aos solos construídos SA-2, onde existem indicativos de processos oxidantes incipientes. Esta conclusão está

fundamentada tanto pelas análises químicas como pelas determinações dos PA e PN.

Os PA e PN determinados na coluna geológica indicam a existência de camadas com alto potencial de gerar DAM, o que deve considerar-se na deposição das camadas de estéreis na construção das áreas mineradas. Embora nos solos já construídos esta recomendação não seja de muita utilidade, com certeza será para o planejamento de novas áreas a serem recuperadas. Portanto, as estimativas do PA e PN que indicam o potencial de gerar DAM das camadas constituintes da coluna geológica servem ao mesmo tempo para selecionar as camadas com alto ou baixo potencial de gerar DAM e estabelecer um ordenamento das mesmas na construção, constituindo-se este passo parte fundamental do planejamento pré-mineração.

Os resultados deste estudo indicam que as propriedades químicas e físicas determinadas nos solos construídos servem como indicadores para o monitoramento de áreas construídas visando à prevenção de danos ambientais.

As análises demonstraram que o solo originalmente encontrado na área da Mina e utilizado na reconstituição da paisagem encontra-se quimicamente deteriorado, apresentando condições de fertilidade inadequadas para o desenvolvimento de vegetais, o que compromete severamente a recuperação das áreas onde serão utilizados estes solos, assim como eleva os custos de implantação e manutenção da vegetação de cobertura.

A variabilidade física e química existente nestes solos construídos é muito ampla em comparação com os solos naturais, dificultando a caracterização dos mesmos. Esta variação pode muitas vezes comprometer a recuperação satisfatória dos solos construídos, já que geralmente os tratamentos realizados após a construção são bastante homogêneos para grandes extensões de terra. Como as variações das características químicas e físicas são grandes, problemas oriundos do manejo inadequado concentram-se com o tempo em locais específicos. Portanto, a identificação e tratamento apropriado de problemas específicos devem ser práticas comuns no manejo de áreas construídas, mais do que práticas gerais aplicadas a todas as áreas.

Os resultados evidenciam a necessidade do desenvolvimento ou adaptação de metodologias específicas para avaliar aspectos químicos nos solos construídos. Assim, sugere-se promover novos trabalhos para testar, comparar e

avaliar diferentes métodos de análise na determinação de diversos aspectos químicos, tentando identificar as análises mais adequadas para a avaliação efetiva destes solos.

Socialmente, para o adequado planejamento da atividade mineradora, é importante destacar a necessidade do estabelecimento de maiores vínculos institucionais entre as empresas mineradoras e os centros de pesquisa e procurar a inserção de técnicos de diversas áreas, formando um grupo multidisciplinar para a obtenção de propostas técnicas mais amplas, que contemplem todos os problemas desenvolvidos nessas áreas mineradas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, E. **Aspectos gerais da recuperação de áreas de solos construídos em minas de carvão.** Porto Alegre, Companhia Riograndense de Mineração, 19 jan. 2004. Entrevista concedida a Rafael Gadea.

ALMEIDA, P.S.G. **Acidificação experimental em materiais estéreis de área de mineração de carvão.** 1999. 118f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999.

ANDREWS, J. A. et al. Minesoil and site properties associated with early height growth of eastern white pine. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.27, p.192-199, 1998.

ARORA, H. S.; DIXON, J. B.; HOSSNER, L. R. Pyrite morphology in lignitic coal and associated strata of east Texas. **Soil Sci.**, Philadelphia, v.125, n.3, p.151-159, 1978.

BELL, J. C.; CONNINGHAM, R. L.; ANTONY, C.T. Morphological characteristics of reconstructed prime farmland soils in western Pennsylvania. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.23, p.515-520, 1994.

BISSANI, C. A.; KÄMPF, N.; LUZ, P. C. R. Determinação de sulfato solúvel em solos tiomórficos de áreas de mineração de carvão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: SBCS, 1995. p.1535–1537.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo.** 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: Freitas Bastos, 1989. 878p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Recife, 1973. 431p. (Boletim técnico, 30).

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de recursos naturais.** Rio de Janeiro, 1986a. 796p., 33v.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Política do meio ambiente.** Brasília, DF: IBAMA, 1986b. 232p. (Boletim técnico, 20).

BUGIN, A. Introdução à recuperação de áreas degradadas. In: TEIXEIRA, E. C. (Coord.). **Meio Ambiente e Carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2002. p.93–98.

BUSSLER, B. H. et al. Properties of minesoil reclaimed for forest land use. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.48, p.178-184, 1984.

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.27, p.1123-1137, 2003.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre, RS: PRONI, 1986. 216p.

CIOLKOSZ, E. J. et al. Characteristics, genesis, and classification of Pennsylvania minesoils. **Soil Science**, Philadelphia, v.139, n.3, p.232-238, 1985.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul, 1994. 223p.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Relatório preliminar de pesquisa área de Boa Vista**. Porto Alegre, set 2000a. (DNPM Nº 810.492/95).

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Alternativas de mineração a céu aberto**. Porto Alegre, out 2000b. (Relatório).

CORRÊA, M. L. T. et al. Métodos de análise de sulfetos em amostras de rochas e sedimentos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.26, p.103-105, 2002.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. **Acid Mine Drainage prediction**. Washington, 1994. (Technical Document EPA 530-R, NTIS PB94).

EVANGELOU, V. P.; GROVE, J. H.; RAWLINGS, F. D. Rates of iron sulfide oxidation in coal spoil suspensions. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.14, p.91-94, 1985.

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

FANNING, D.S.; BURCH, S.N. Coastal acid sulfate soil. In: BARNHISEL, R. (Ed.) **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society Agronomy, 2000. p.921-938.

GEIDEL, G.; CARUCCIO, F.T. Geochemical factors affecting coal mine drainage quality. In: BARNHISEL, R. (Ed.) **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society Agronomy, 2000. p.105-130.

GIASSON, E.; KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. Caracterização físico-hídrica de solos construídos após mineração de carvão no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa-MG. **Anais...** Viçosa-MG: SBCS, 1995. p.156-157.

GUO, W.; PARIZEK, R. R.; ROSE, A. W. The role of thermal convection in resupplying O<sub>2</sub> to strip coal-mine spoil. **Soil Sci.**, Philadelphia, v.158, n.1, p.47-55, 1994.

HAERING, K. C.; LEE D. W.; ROBERTS, J .A. Changes in mine soil properties resulting from overburden weathering. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.22, p.194-200, 1993.

KÄMPF, N.; SCHEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa-MG, v.21, p.79-88, 1997.

KÄMPF, N. et al. Solos construídos em áreas de mineração da Bacia Carbonífera. In: Centro de Ecologia – UFRGS. **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000. p. 596-640.

KARATHANASIS, A D.; EVANGELOU, V. P.; THOMPSON, Y. L. Aluminum and iron equilibria in soil solutions and surface waters of acid mine watersheds. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.17, n.4, p.534-543, 1988.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ed. Ceres, 1979. 262p.

KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. Mineração. In: TEIXEIRA, E. C. (Coord.). **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2002. p.15-27.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas: SBCS/SNLCS, 1984. 46p.

LOPES, M.A.R. **Código Civil**. 5. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2000. 69p.

LOPES, R.H.Z. Ações do IBAMA na recuperação de áreas degradadas. In: DIAS, L.E., MELLO, J.W.V. **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1998. p.247-251.

Mc LEAN, E. O. Aluminium. In: BLACK, C. A. et al. **Methods of soil analysis**. Part. 2. Madison: ASA, 1965. p. 978-998. (Agronomy Series 9).

Mc SWEENEY, K; JANSEN, I. J. Soil structure and associated rooting behavior in minesoils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.48, p.607-612, 1984.

MELLO, J. W. V.; DIAS, L. E.; CORREA, M. L. T. Drenagem ácida: avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados. In: CURI, N. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.401-430.

MERMUT, A. R.; CURTIN, D.; ROSTAD, H. P. W. Micromorphological and Submicroscopical features related to pyrite oxidation in an Inland Marine Shale from east Central Saskatchewan. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.49, p.256-261, 1985.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. Cap. 5.

NUNES, M.C.D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota - RS**. 2002. 136f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciências do Solo), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2002.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 414p.

ORTIZ, L.; TEIXEIRA, E. C. Influência das atividades de processamento do carvão sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais. In: TEIXEIRA, E. C. (Coord.). **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2002. p.301–340.

O'SHAY, T.; HOSSNER, L. R.; DIXON, J. B. A modified hydrogen peroxide oxidation method for determination of potential acidity in pyritic overburden. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.19, p.778-782, 1990.

PEDERSEN, T.A; ROGOWSKI, A.S.; PENNOCK JR, R. Physical characteristics of some minesoils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.44, p.321-328, 1980.

PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. Contaminação dos solos construídos. In: TEIXEIRA, E. C. (Coord.). **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2002. p.69-92.

PINTO, L.F.S. **Potencial de acidificação e neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão**. 1997. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciências do Solo) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1997.

PITCHEL, J. R.; DICK, W. A.; SUTTON, P. Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.23, p.766-772, 1994.

POTTER, K. N.; CARTER, F. S.; DOLL, E. C. Physical properties of constructed and undisturbed soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.52, p.1453-1438, 1988.

SALOMONS, W. Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v.52, p.5-23, 1995.

SANCHEZ, J.C.D.; FORMOSO, M.L.L. **Utilização do carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: CIENTEC, 1990. 34p. (Boletim técnico, 20).

SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2, 1989, Santa Maria, RS. **Anais.....** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1989. 224p.

SENCINDIVER, J.C.; AMMONS, J.T. Mine soil genesis and classification. In: BARNHISEL, R. (Ed.) **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society of Agronomy, 2000. p.595-614.

SIGMAPLOT Science Software: SigmaPlot for Windows, versão 8.02. Chicago: SPSS, 2002. 1 CD-ROM.

SINGER, P. C.; STUMM, W. Acid mine drainage: the rate – determining step. **Science**, Washington, DC, v.167, p.1121-1123, 1970.

SKOUSEN, J.; SEXSTONE, A.; ZIEMKIEWICZ, P. Acid mine drainage control and treatment. In: BARNHISEL, R. (Ed.) **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society of Agronomy, 2000. p.131-168.

SNARSKI, R. R.; FEHRENBACHER, J. B.; JANSEN, I. J. Physical and chemical characteristics of pre-mine soils and post-mine soil mixtures in Illinois. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.45, p.806-812, 1981.

SOARES, E. R. et al. Efeito da compactação e  $\text{CaCO}_3$  na oxidação da pirita em estéril de mineração de carvão. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v.26, p.65-73, 2002.

SPARKS, D. L. **Environmental Soil Chemistry**. London: Academic Press, 1995. 267p.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS, 2002. 107p.

TEDESCO, J. M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico nº 5).

TEIXEIRA, O. P. B. Legislação ambiental aplicada ao carvão. In: TEIXEIRA, E. C. (Coord.). **Meio Ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2002. p.473–486.

TERRENCE, J. T.; BLACK, J. P. Topographic reconstruction: the theory and practice. In: BARNHISEL, R. I. (Ed.). **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society of Agronomy, 2000. p.41-75.

## 7. APÊNDICES

### APÊNDICE 1. Descrição morfológica do perfil modal do solo natural

Perfil – SN

Data – 06/11/02

**CLASSIFICAÇÃO: PLINTOSSOLO ARGILÚVICO**

LOCALIZAÇÃO

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Plano

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – Não aparente

DRENAGEM – Moderadamente drenado

USO ATUAL – Área de mineração

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea, E. Giasson e A. Inda Junior

- 
- A 0 – 25 cm, bruno escuro (7,5 YR 3/2, matriz), vermelho-amarelado(5YR 4/6, mosqueado); franco argilosa; moderada média a muito grande e moderada pequena blocos sub-angulares; ligeiramente duro, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- B 25 – 47 cm, cinzento-avermelhado-escuro (5YR 4/2, matriz), bruno-forte (7,5YR 4/6, mosqueado); muito argilosa; fraca média a pequena blocos sub-angulares; macio, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.
- Bf1 47 – 73 cm, bruno (10YR 4/3, matriz), bruno-forte (7,5R 4/6, mosqueado); muito argilosa; fraca pequena os médios blocos sub-angulares; macio, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- Bf2 73 – 96 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, matriz), bruno forte (7,5R 4/6, mosqueado); muito argilosa; fraca grandes escassos blocos sub-angulares; macio, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa plana.
- BCf 96 – 130+ cm, cinzento-avermelhado (2,5Y 5/1, matriz), bruno forte (7,5R 4/6, mosqueado); muito argilosa; fraca muito pequena blocos sub-angulares; macio, muito friável, plástica e pegajosa.
- RAÍZES Pequenas comuns e médias raras no A; pequenas e poucas no AB; grandes e poucas no B1; pequenas e poucas no B2.
- Presença de plintita a partir dos 47 cm de profundidade.

Presença de cascalho no horizonte A.

Poros poucos, muito pequenos no A, comuns, pequenos e médios no AB, abundantes, pequenos no B1 e poucos, muito pequenos no B2.

**APÊNDICE 2.** Descrição morfológica do perfil modal 1 da sub-área solos construídos (SA-24)

Perfil – P1-24

Data – 04/09/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403345/6662566

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – laminar e sulco

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e A. Inda Junior

- A 0 – 4 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3); argilosa; moderada pequena a grande bloco sub-angulares; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C1 4 – 15 cm, vermelho-escuro (2,5YR 3/6); argilosa; maciça; firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C2 15 – 67 cm, bruno-avermelhado (2,5YR 4/4), bruno-avermelhado (5YR 4/4, inclusão); muito argilosa; maciça; firme, ligeiramente plástica a plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C3 67 – 98 cm, vermelho (2,5YR 4/6, matriz), bruno-oliváceo-claro e bruno-acinzentado (2,5Y 5/6, 2,5Y 5/2, mosqueado); muito argilosa; maciça; firme, ligeiramente plástica a plástica e pegajosa.
- RAÍZES fasciculares e comuns na camada 1, fasciculares e poucas na camada 2, fasciculares e poucas na camada 3.
- Presença de muitas concreções nas camadas 2 e 4.
- Poros poucos e muitos pequenos na camada 1.

**APÊNDICE 3.** Descrição morfológica do perfil modal 2 da sub-área solos construídos (SA-24)

Perfil – P2-24

Data – 04/09/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403460/6662475

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – voçoroca

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e A. Inda Junior

- 
- A 0 – 26 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4); argilosa; maciça; ligeiramente duro; friável; ligeiramente plástica; ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C1 26 – 61 e 26 - 73 cm, cinzento-escuro (5YR 4/1, matriz), vermelho (2,5YR 5/6); muito argilosa; maciça; duro, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição abrupta ondulada.
- C2 61 – 69 e 73 - 79 cm, preto (2,5Y 2,5/0); muito argilosa; maciça; duro, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição abrupta ondulada.
- C3 69 – 96 e 79 - 96 cm, cinzento-claro (2,5Y 7/1); muito argilosa; maciça; duro, firme, ligeiramente plástica, não pegajosa.
- Sem poros visíveis em todas as camadas.
- RAÍZES fasciculares comuns na camada 1; fasciculares poucas na camada 2 e 3 e ausência de raízes na camada 4.

**APÊNDICE 4.** Descrição morfológica do perfil modal 3 da sub-área solos construídos (SA-24)

Perfil – P3-24

Data – 25/09/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403240/6662518

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – voçoroca

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e A. Inda Junior

- 
- A 0 – 20 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4); argilosa; maciça; ligeiramente plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C1 20 – 58 cm, bruno-amarelado (10YR 5/8, matriz), cinzento muito escuro (2,5Y 3/0, inclusão); muito argilosa; maciça; muito plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C2 58 – 82 cm, vermelho (2,5YR 4/6); Argilosa; maciça; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C3 82 – 89 cm, preto (2,5Y 2/0); argilo siltosa; maciça; muito plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C4 89 - 113 cm, cinzento (2,5Y 5,5/0, matriz); muito argilosa; maciça; muito plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C5 113 – 122+ cm, cinzento-escuro (10YR 4/1); muito argilosa; maciça; plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES fasciculares e muitas na camada 1, fasciculares e comuns na camada 2, fasciculares e poucas na camada 3.

Presença de concreções na camada 3.

Sem poros visíveis em todas as camadas.

**APÊNDICE 5.** Descrição morfológica do perfil modal 4 da sub-área de solos construídos (SA-24)

Perfil – P4-24

Data – 20/08/03

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403512/6662641

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – sulcos

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento de Pinus, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e A dos Santos

- 
- A 0 – 4 cm, bruno-escuro (7,5YR 4/4); transição abrupta plana
- A 4 – 9 cm, bruno-avermelhado (2,5YR 4/5), franco arenosa; moderada média a muito grande e moderada pequena blocos sub-angulares; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana.
- C1 9 – 27 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/5); franco arenosa; maciça; plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa plana.
- C2 27 – 46 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4); franco arenosa; maciça; plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C3 46 - 74 cm, cinzento-escuro (7,5YR 3,5/0); Franco argilo arenosa; maciça; ligeiramente plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C4 74 – 84 cm, vermelho (10R 4/6, matriz), bruno-oliváceo-claro (2,5 Y 4,5/4), cinzento (5y 6,5/1 inclusões); franco argilo arenosa; maciça; ligeiramente plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C5 84 – 100+ cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4,5/4); argilo arenosa; maciça; ligeiramente plástica e pegajosa.

RAÍZES fasciculares e abundantes na camada 1, fasciculares e comuns na camada 2, fasciculares e abundantes na camada 3, fasciculares e poucas na camada 4, fasciculares e raras na camada 5

Presença de concreções freqüentes na camada 1, concreções e nódulos abundantes na camada 2, concreções abundantes e nódulos freqüentes na camada 3, e poucas concreções na camada 5

Sem poros visíveis em todas as camadas

**APÊNDICE 6.** Descrição morfológica do perfil modal 1 da sub-área de solos construídos (SA-2)

Perfil – P1-2

Data – 06/11/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403012/6662969

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – voçoroca

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e E. Giasson

- 
- A 0 – 58 cm, mistura; argilosa; maciça; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C1 58 – 75 cm, bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4, matriz), mistura; muito argilosa; maciça; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C2 75 – 87 cm, cinzento-escuro (2,5Y 4/0, matriz), vermelho (2,5YR 4/6, mosqueado); argilo arenosa; maciça; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição abrupta plana.
- C3 87 – 100+ cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4,5/4, matriz), mistura; muito argilosa; maciça; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES não visíveis em todas as camadas

Sem poros visíveis em todas as camadas

**APÊNDICE 7.** Descrição morfológica do perfil modal 2 da sub-área solos construídos (SA-2)

Perfil – P2-2

Data – 06/11/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403035/6662961

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – voçoroca

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e E. Giasson

- 
- A 0 – 16 cm, mistura; argilosa; grãos simples; solto, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C1 16 – 53 cm, mistura; muito argilosa; maciça; firme, duro, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C2 53 – 65 cm, amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8, matriz), preto (2,5Y 2,5/2, mosqueado); argilo-siltosa; maciça; ligeiramente duro, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C3 65 – 89 cm, preto (2,5Y 2,5/0, matriz), bruno-acinzentado-escuro (2,5Y 4/2, mosqueado); Franco argilo-siltosa; maciça; muito duro, muito firme, plástica e ligeiramente pegajosa, transição clara plana.
- C4 89 – 104 cm, preto (2,5Y 2,5/0); muito argilosa; maciça; muito duro, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C5 104 – 112 cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4/3, matriz), mistura; muito argilosa; maciça; duro, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C6 112 – 118+ cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4/3, matriz), mistura; argilosa; maciça, duro, firme, plástica e pegajosa.

Sem poros visíveis em todas as camadas

Presença de abundante cascalho nas camadas 1 e 2

**APÊNDICE 8.** Descrição morfológica do perfil modal 3 da sub-área de solos construídos (SA-2)

Perfil – P3-2

Data – 06/11/02

LOCALIZAÇÃO – UTM 0403061/6662961

MUNICÍPIO, ESTADO – Minas de Carvão Mineral Boa Vista, Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS)

SITUAÇÃO – parte superior da toposequência

MATERIAL ORIGINÁRIO – Descarte de Mineração de Carvão

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa

ROCHOSIDADE – Não rochosa

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

REGIONAL – Suave ondulado, ondulado

EROSÃO – voçoroca

DRENAGEM – Imperfeitamente drenado

USO ATUAL – Reflorestamento, refúgio de fauna e flora

DESCRITO E COLETADO POR – R. Gadea e E. Giasson

- 
- A 0 – 14 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, matriz), mistura; muito argilosa; forte granular; duro, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara plana.
- C1 14 – 34 cm, mistura; muito argilosa; maciça; firme, duro, plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C2 34 – 48 cm, cinzento-oliváceo (5Y 4/2); argilo siltosa; maciça; duro, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta plana.
- C3 48 – 61 cm, cinzento (7,5YR 5/1, matriz), amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8, mosqueado); muito argilosa; maciça; duro, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição abrupta plana.
- C4 61 – 75+ cm, preto (2,5Y 2/0, matriz), mistura; franco argilo arenosa; maciça; duro, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES – Fasciculares e raras nas camadas 1 e 3

Sem poros visíveis em todas as camadas, com exceção da camada 1 com poros muito pequenos e comuns

Presença de cascalho comuns na camada 1

**APÊNDICE 9.** Granulometria dos distintos horizontes do perfil do solo natural

<b>Espessura</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>
cm	-----g kg <sup>-1</sup> -----		
<b>Solo Natural</b>			
0-25	426	279	295
25-47	110	190	700
47-73	152	198	650
73-96	148	192	660
96-130+	181	184	635

**APÊNDICE 10.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P1-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

<b>Espessura</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	<b>Ds</b>	<b>K</b>
cm	-----g kg <sup>-1</sup> -----			g cm <sup>-3</sup>	cm h <sup>-1</sup>
<b>P1-24</b>					
0-4	170	370	460	-	-
4-15	269	186	545	1,9	1,5
15-67	147	138	715	2,0	1,1
15-67	208	177	615	2,0	1,1
67-98	269	181	550	2,2	0,1
98+	23	292	685	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 11.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P2-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

<b>Espessura</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	<b>Ds</b>	<b>K</b>
cm	-----g kg <sup>-1</sup> -----			g cm <sup>-3</sup>	cm h <sup>-1</sup>
<b>P2-24</b>					
0-26	319	186	495	1,8	7,3
26-61	37	303	660	1,8	0,0
61-69	62	283	655	2,0	0,0
69-96+	13	322	665	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 12.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P3-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>K</b> cm h <sup>-1</sup>
<b>P3-24</b>					
0-20	295	225	480	1,7	9,6
20-58	13	362	625	1,7	0,0
20-58	4	341	655	1,7	0,0
58-82	219	196	585	1,8	1,0
82-89	140	470	390	-	-
89-113	27	273	700	-	-
113-122	25	315	660	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 13.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P4-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>K</b> cm h <sup>-1</sup>
<b>P4-24</b>					
4-9	680	158	162	-	-
9-27	625	246	129	2,0	6,5
27-46	645	207	148	1,8	5,8
46-74	695	65	240	2,0	0,0
74-84	700	100	200	2,0	0,0
84-100	660	9	331	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 14.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P1-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>K</b> cm h <sup>-1</sup>
<b>P1-2</b>					
0-58	147	333	520	1,7	0,1
58-75	20	260	720	1,8	0,1
58-75	14	206	780	1,8	0,1
75-87	660	23	317	-	-
75-87	400	283	317	-	-
87-100+	28	362	610	2,0	0,1

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 15.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P2-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>K</b> cm h <sup>-1</sup>
<b>P2-2</b>					
0-16	203	287	510	-	-
16-53	13	347	640	2,2	1,1
53-65	22	483	495	2,4	0,0
65-89	40	645	315	2,0	0,3
89-104	12	348	640	2,1	0,5
104-112	94	236	670	-	-
112-118+	125	345	530	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 16.** Granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada das distintas camadas do P3-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>K</b> cm h <sup>-1</sup>
<b>P3-2</b>					
0-14	86	164	750	1,8	0,1
14-34	73	262	665	2,0	0,0
34-48	107	493	400	2,1	0,0
48-61	8	207	785	2,3	0,1
61-75+	575	103	322	-	-

Ds= densidade do solo; K= condutividade hidráulica saturada

**APÊNDICE 17.** Granulometria das distintas camadas da coluna geológica

<b>Espessura</b> cm	<b>Areia</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Silte</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----	<b>Argila</b> -----g kg <sup>-1</sup> -----
<b>Coluna Geológica</b>			
260-450	5	210	785
450-630	5	270	725
630-970	44	421	535
970-995	40	450	510
995-1095	369	321	310
1095-1375	7	348	645
1375-1625	14	326	660
1625-1675	13	402	585
1675-1975	23	447	530

**APÊNDICE 18.** Taxa de infiltração determinada para o perfil do solo natural

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>Solo natural</b>						
0	16,0		-	-	-	0
1	15,2		0,8	1	48,0	0,8
2	14,3		0,9	1	54,0	1,7
3	14,1	16,5	0,2	1	12,0	1,9
4	16,4		0,1	1	6,0	2,0
5	16,3		0,1	1	6,0	2,1
10	16,0		0,3	5	3,6	2,4
20	15,5		0,5	10	3,0	2,9
30	15,0	16,8	0,5	10	3,0	3,4
45	16,1		0,7	15	2,8	4,1
60	15,4		0,7	15	2,8	4,8
90	14,6	16,1	0,8	30	1,6	5,6
120	15,0		1,1	30	2,2	6,7

**APÊNDICE 19.** Taxa de infiltração determinada para o P1-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P1-24</b>						
0	8,4		-	-	-	0
1	8,2		0,2	1	12,0	0,2
2	8,1		0,1	1	6,0	0,3
3	8,1		0,0	1	3,0	0,4
4	8,0		0,1	1	3,0	0,4
5	8,0		0,0	1	0,0	0,4
10	7,8		0,2	5	2,4	0,6
20	7,7		0,1	10	0,6	0,7
30	7,6		0,1	10	0,6	0,8
45	7,5		0,1	15	0,4	0,9
60	7,4		0,1	15	0,4	1,0
90	7,3		0,1	30	0,2	1,1
120	7,2		0,1	30	0,2	1,2

**APÊNDICE 20.** Taxa de infiltração determinada para o P2-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P2-24</b>						
0	9,7		-	-	-	0
1	8,7		1,0	1	60,0	1,0
2	8,5		0,2	1	12,0	1,2
3	8,3		0,2	1	12,0	1,4
4	8,1		0,2	1	12,0	1,6
5	7,9	9,7	0,2	1	12,0	1,8
10	9,0		0,7	5	8,4	2,5
20	7,5		1,5	10	9,0	4,0
30	6,3	10,1	1,2	10	7,2	5,2
45	9,1	10,1	1,0	15	4	6,2
60	9,9	9,2	0,2	15	0,8	6,4
90	5,8		3,4	30	6,8	9,8
120	5,7		0,1	30	0,2	9,9

**APÊNDICE 21.** Taxa de infiltração determinada para o P3-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P3-24</b>						
0	8,5		-	-	-	0
1	8,0		0,5	1	30,0	0,5
2	7,7		0,3	1	18,0	0,8
3	7,7		0,0	1	0,0	0,8
4	7,6		0,1	1	6,0	0,9
5	7,5		0,1	1	6,0	1,0
10	7,3	8,1	0,2	5	2,4	1,2
20	7,9		0,2	10	1,2	1,4
30	7,6		0,3	10	1,8	1,7
45	7,2	8,6	0,4	15	1,6	2,1
60	8,1		0,5	15	2	2,6
90	7,1		1,0	30	2	3,6
120	7,1		0,0	30	0	3,6

**APÊNDICE 22.** Taxa de infiltração determinada para o P4-24 do solo construído da sub-área (SA-24)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P4-24</b>						
0	9,6		-	-	-	0
1	9,0		0,6	1	36,0	0,6
2	8,8		0,2	1	12,0	0,8
3	8,6		0,2	1	12,0	1,0
4	8,5		0,1	1	6,0	1,1
5	8,3	9,2	0,2	1	12,0	1,3
10	8,6		0,6	5	7,2	1,9
20	7,6	9,6	1,0	10	6	2,9
30	8,8		0,8	10	4,8	3,7
45	7,9		0,9	15	3,6	4,6
60	7,1	9,4	0,8	15	3,2	5,4
90	7,7	9,5	1,7	30	3,4	7,1
120	7,7		1,8	30	3,6	8,9

**APÊNDICE 23.** Taxa de infiltração determinada para o P1-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P1-2</b>						
0	7,5		-	-	-	0
1	7,3		0,2	1	12,0	0,2
2	7,2		0,1	1	6,0	0,3
3	7,1		0,1	1	6,0	0,4
4	7,1		0,0	1	0,0	0,4
5	7,1		0,0	1	0,0	0,4
10	7,0		0,1	5	1,2	0,5
20	7,0		0,0	10	0,0	0,5
30	6,9	7,8	0,1	10	0,6	0,6
45	7,7		0,1	15	0,4	0,7
60	7,6		0,1	15	0,4	0,8
90	7,5		0,1	30	0,2	0,9
120	7,2		0,3	30	0,6	1,2

**APÊNDICE 24.** Taxa de infiltração determinada para o P2-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada cm
<b>P2-2</b>						
0	12,2		-	-	-	0
1	10,7		1,5	1	90,0	1,5
2	10,5		0,2	1	12,0	1,7
3	10,3		0,2	1	12,0	1,9
4	10,3		0,0	1	0,0	1,9
5	10,3		0,0	1	0,0	1,9
10	10,0		0,3	5	3,6	2,2
20	9,9		0,1	10	0,6	2,3
30	9,7		0,2	10	1,2	2,5
45	9,6		0,1	15	0,4	2,6
60	9,4		0,2	15	0,8	2,8
90	9,3		0,1	30	0,2	2,9
120	9,2		0,1	30	0,2	3,0

**APÊNDICE 25.** Taxa de infiltração determinada para o P3-2 do solo construído da sub-área (SA-2)

Tempo minutos	Leitura	Leitura ajustada	h	t	Taxa de infiltração cm h <sup>-1</sup>	Lâmina acumulada Cm
<b>P3-2</b>						
0	13,3		-	-	-	0
1	13,1		0,2	1	12,0	0,2
2	13,1		0,0	1	0,0	0,2
3	13,1		0,0	1	0,0	0,2
4	13,1		0,0	1	0,0	0,2
5	13,1		0,0	1	0,0	0,2
10	13,1		0,0	5	0,0	0,2
20	13,0		0,1	10	0,6	0,3
30	13,0		0,0	10	0,0	0,3
45	12,9		0,1	15	0,4	0,4
60	12,8		0,1	15	0,4	0,5
90	12,6		0,2	30	0,4	0,7
120	12,5		0,1	30	0,2	0,8

**APÊNDICE 26.** Propriedades químicas do solo natural

Horiz.	espe. cm	pH				CO %	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca	Mg	Na	K	S	Al	H+Al	CTC efetiva	CTC pH7	V %	m
		H <sub>2</sub> O	KCl	Ä pH	SMP													
----- SOLO NATURAL -----																		
A	0-25	4,2	3,6	-0,6	4,2	1,8	125,8	4,7	7,3	0,1	0,2	12,2	5,4	13,5	17,6	25,7	47,6	30,4
B	25-47	4,1	3,5	-0,6	3,9	1,4	263,5	3,9	15,2	0,1	0,2	19,5	13,3	23,4	32,8	42,9	15,4	40,6
Bf1	47-73	4,1	3,5	-0,6	3,6	0,6	275,5	6,0	15,5	0,1	0,3	22,0	13,4	20,2	35,4	42,2	52,1	37,8
Bf2	73-96	4,2	3,5	-0,7	3,9	0,4	257,0	6,8	2,6	0,2	0,4	9,8	13,5	19,3	23,3	29,2	33,7	57,8
BCf	96-130+	4,3	3,5	-0,8	4,0	0,2	192,6	5,4	0,6	0,2	0,4	6,5	13,5	18,5	20,0	25,1	26,0	67,4

S= soma de bases, V= saturação por bases, m= saturação por Al

**APÊNDICE 27.** Propriedades químicas dos solos construídos da sub-área (SA-24)

Cam.	Espe. cm	pH		SMP	CO %	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca	Mg	Na	K	S	Al	H+Al	CTC efetiva	CTC pH7	V %	m	
		H <sub>2</sub> O	KCl															
<b>P1-24</b>																		
A 1	0-4	3,9	3,1	-0,8	4,2	10,3	144	2,2	0,6	<0,01	1,6	4,4	9,5	26,3	13,9	30,7	14,3	68,4
C 2	4-15	4,0	3,4	-0,6	4,1	1,3	126	1,2	0,3	<0,01	1,0	2,5	7,7	14,9	10,2	17,4	14,4	75,4
C 3	15-67	4,3	3,6	-0,7	4,1	1,0	145	2,3	2,1	0,1	1,5	6,0	9,0	16,6	14,9	22,6	26,4	60,1
C 3	15-67	4,4	3,7	-0,7	4,3	0,7	94	2,6	1,5	<0,01	1,0	5,2	6,3	13,0	11,5	18,1	28,6	54,9
C 4	67-98	4,6	3,8	-0,8	5,0	0,8	62	1,9	1,8	<0,01	0,9	4,6	3,4	9,5	8,0	14,2	32,6	42,4
C 5	98+	4,3	3,3	-1,0	4,2	0,4	121	3,2	1,0	0,3	0,7	5,2	4,9	9,5	10,1	14,7	35,2	48,5
<b>P2-24</b>																		
A 1	0-26	4,9	3,9	-1,0	5,7	1,4	76	4,6	2,1	<0,01	2,7	9,5	1,3	7,2	10,8	16,7	56,8	12,2
C 2	26-61	4,1	3,1	-1,0	4,6	0,8	173	6,9	1,7	0,1	0,8	9,5	5,4	9,3	14,9	18,8	50,5	36,4
C 3	61-69	3,7	3,1	-0,6	5,3	1,2	329	4,9	6,5	0,1	2,8	14,3	3,3	6,8	17,6	21,0	67,9	18,8
C 4	69-96+	3,9	3,2	-0,7	5,4	<0,01	298	5,7	5,2	0,1	2,3	13,4	3,6	5,2	16,9	18,6	72,0	21,1
<b>P3-24</b>																		
A 1	0-20	5,4	4,2	-1,2	6,1	1,4	29	4,2	2,5	0,1	0,4	7,2	0,3	6,6	7,5	13,8	52,0	4,2
C 2	20-58	5,6	3,5	-2,1	5,2	0,2	12	7,7	4,6	0,2	0,1	12,6	3,8	7,5	16,4	20,1	62,6	23,1
C 2	20-58	5,2	3,5	-1,7	5,4	0,5	31	6,9	4,4	0,3	0,1	11,7	2,6	7,2	14,3	18,9	61,9	18,2
C 3	58-82	5,0	3,8	-1,2	4,6	0,8	25	4,0	12,5	0,1	0,2	16,7	4,7	9,6	21,4	26,3	63,5	22,1
C 4	82-89	5,3	3,5	-1,8	3,8	14,7	10	3,9	3,3	0,2	0,1	7,4	9,2	71,8	16,6	79,2	9,4	55,3
C 5	89-113	5,0	3,6	-1,4	3,7	0,1	22	4,6	0,9	0,1	0,3	5,8	6,0	9,1	11,8	14,9	39,1	50,7
C 5	113-122+	4,7	3,4	-1,3	5,0	0,4	34	5,0	1,1	0,1	0,2	6,5	3,0	7,6	9,4	14,1	45,8	31,4
<b>P4-24</b>																		
Acícula	0-4	3,9	3,3	-0,6	4,2	3,5	124,0	0,5	0,5	<0,01	0,3	1,3	10,9	34,2	12,2	35,5	3,7	89,2
A 1	4-9	4,3	3,6	-0,7	4,2	1,2	89,1	0,5	0,4	<0,01	0,2	1,1	8,9	21,9	10,0	23,0	4,9	88,7
C 2	9-27	4,6	3,6	-1,0	4,4	0,9	66,5	0,8	0,5	<0,01	0,1	1,5	6,0	16,4	7,5	17,9	8,2	80,2
C 3	27-46	4,8	3,7	-1,1	4,8	0,6	55,7	1,7	1,2	<0,01	0,1	3,1	4,2	13,3	7,3	16,3	18,7	58,0
C 4	46-74	4,5	3,4	-1,1	4,9	0,6	80,6	4,7	9,5	0,1	0,5	14,7	3,3	10,7	18,1	25,5	57,8	18,4
C 5	74-84	4,5	3,5	-1,0	5,4	0,1	203,6	3,1	6,3	0,1	0,2	9,8	2,7	9,3	12,5	19,0	51,3	21,7
C 6	84-100+	4,5	3,2	-1,3	3,9	0,1	76,5	9,0	17,0	0,3	0,5	26,7	12,1	24,8	38,8	51,4	51,9	31,2

S= soma de bases, V= saturação por bases, m= saturação por Al

**APÊNDICE 28.** Propriedades químicas dos solos construídos da sub-área (SA-2)

Cam.	espe. cm	H <sub>2</sub> O	pH		SMP	CO %	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca	Mg	Na	K	S cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Al	H+Al	CTC efetiva	CTC pH7	V %	m
			KCl	Δ pH														
<b>P1-2</b>																		
A 1	0-58	4,6	3,5	-1,1	4,2	0,3	65	4,0	1,7	0,1	1,5	7,3	8,1	11,9	15,5	19,2	38,1	52,7
C 2	58-75	4,5	3,3	-1,2	4,0	0,0	77	8,6	1,4	0,2	0,7	10,9	13,1	16,4	24,0	27,3	40,0	54,5
C 2	58-75	4,2	3,4	-0,8	3,9	0,2	235	6,6	10,0	0,2	0,6	17,4	16,0	18,6	33,4	36,0	48,4	47,8
C 3	75-87	3,9	3,0	-0,9	4,1	0,7	273	7,2	1,5	0,2	0,7	9,5	7,7	12,3	17,2	21,8	43,5	44,8
C 3	75-87	4,1	3,5	-0,6	5,8	22,1	124	2,4	2,6	0,0	1,3	6,4	1,8	4,7	8,2	11,0	57,9	22,4
C 4	87-100+	4,0	3,1	-0,9	4,1	0,4	166	8,3	11,4	0,1	0,7	20,5	8,0	12,8	28,4	33,3	61,5	28,0
<b>P2-2</b>																		
A 1	0-16	4,2	3,4	-0,8	4,1	1,1	184	5,3	2,8	0,1	0,4	8,6	7,2	13,8	15,8	22,4	38,3	45,7
C 2	16-53	6,6	5,7	-0,9	7,3	0,7	360	8,7	4,3	0,2	0,1	13,4	0,0	1,2	13,4	14,6	92,0	0,0
C 3	53-65	7,0	6,2	-0,8	7,3	0,3	373	2,3	6,8	0,4	0,1	9,6	0,0	0,5	9,6	10,0	95,5	0,0
C 4	65-89	5,9	5,1	-0,8	7,2	1,5	385	8,2	11,6	0,3	0,6	20,7	0,0	1,6	20,7	22,3	92,9	0,0
C 5	89-104	4,6	3,7	-0,9	6,1	0,1	357	12,3	2,8	0,5	0,5	16,1	1,5	4,9	17,7	21,0	76,8	8,7
C 6	104-112	4,4	3,8	-0,6	6,0	0,2	252	7,2	11,2	0,3	0,6	19,4	1,5	5,4	20,9	24,8	78,1	7,4
C 7	112-118+	5,5	4,6	-0,9	6,6	0,5	243	9,6	1,8	0,4	0,8	12,6	0,2	3,2	12,8	15,8	79,8	1,4
<b>P3-2</b>																		
A 1	0-14	4,1	3,4	-0,7	3,3	1,5	163	8,8	17,7	0,1	0,1	26,6	20,7	29,7	47,3	56,4	47,2	43,7
C 2	14-34	4,3	3,4	-0,9	3,4	1,1	167	6,8	1,6	0,2	0,2	8,9	11,6	17,6	20,5	26,4	33,5	56,8
C 3	34-48	6,8	5,8	-1,0	7,3	0,4	214	2,7	7,0	0,4	0,1	10,2	0,0	1,9	10,2	12,1	84,3	0,0
C 4	48-61	4,0	3,3	-0,7	5,9	0,1	342	8,2	3,0	0,2	0,1	11,6	1,7	5,0	13,2	16,6	69,7	12,6
C 5	61-75+	4,3	3,6	-0,7	5,6	3,9	355	8,0	3,2	0,3	0,1	11,7	2,0	8,1	13,7	19,7	59,2	14,8

S= soma de bases, V= saturação por bases, m= saturação por Al

**APÊNDICE 29.** Características químicas das camadas da coluna geológica

Cam.	espessura cm	pH				SMP	CO %	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca	Mg	Na	K	S	Al	H+Al	CTC efetiva	CTC pH7	V -----%	m
		H <sub>2</sub> O	KCl	Ä	pH														
<b>Coluna Geológica</b>																			
C 1	260-450	3,9	3,4	-0,5	3,7	0,1	499	8,7	4,0	0,3	0,8	13,8	23,9	27,3	37,7	41,1	33,6	63,4	
C 2	450-630	3,8	3,3	-0,5	3,8	0,0	362	5,9	6,0	0,3	0,7	12,9	18,3	21,7	31,2	34,5	37,3	58,8	
C 3	630-970	3,3	3,1	-0,2	4,1	38,6	595	7,2	1,8	0,2	1,6	10,7	9,1	23,7	19,8	34,4	31,2	45,8	
C 4	970-995	2,7	2,3	-0,4	2,9	0,6	1877	6,8	3,6	0,2	1,8	12,4	33,4	37,9	45,7	50,2	24,6	73,0	
C 5	995-1095	2,8	2,8	0,0	4,2	12,4	1068	2,6	3,9	0,1	1,3	7,9	11,1	28,8	19,0	36,7	21,5	58,5	
C 6	1095-1375	3,1	2,7	-0,4	3,6	3,2	998	5,8	1,7	0,2	0,8	8,5	20,6	27,3	29,1	35,8	23,6	70,9	
C 7	1375-1625	2,9	2,4	-0,5	3,2	1,8	1050	3,0	2,3	0,2	0,6	6,1	21,1	31,8	27,2	37,9	16,2	77,5	
C 8	1625-1675	3,8	3,0	-0,8	3,5	0,3	373	5,1	0,6	0,2	1,0	6,8	20,5	29,5	27,4	36,4	18,8	75,0	
c 9	1675-1975	4,1	3,4	-0,7	4,0	3,1	369	5,8	0,9	0,2	0,8	7,7	10,7	16,5	18,4	24,2	31,8	58,2	

S= soma de bases, V= saturação por bases, m= saturação por Al

**APÊNDICE 30.** Elementos químicos determinados no solo natural

Hori.	Espe. cm	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S-SO <sub>4</sub>	Ki	Kr
		-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Solo natural</b>										
A	0-25	36,3	37,6	0,00	3,5	144,0	0,8	172,1	5,7	4,0
B	25-47	69,4	120,9	0,13	5,0	281,8	0,7	293,6	3,5	2,9
Bf1	47-73	98,8	134,0	0,13	4,8	295,3	0,6	245,3	3,3	2,5
Bf2	73-96	76,5	132,4	0,00	4,6	273,9	0,3	250,9	3,1	2,6
BCf	96-130+	112,5	140,6	0,13	6,1	252,7	0,2	181,1	2,7	2,0

**APÊNDICE 31.** Elementos químicos determinados nos solos construídos da sub-área (SA-24)

Camada	Espe. cm	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S-SO <sub>4</sub>	Ki	Kr
		-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>P1-24</b>										
	0-4	39,3	140,6	0,13	5,3	214,6	1,3	19,1	2,6	2,2
A 1	4-15	87,1	137,4	0,13	6,5	217,0	1,1	306,0	2,7	1,9
C 2	15-67	97,7	167,1	0,13	5,8	263,9	0,9	286,9	2,7	2,0
C 2	15-67	98,8	147,2	<0,01	6,0	223,6	1,0	261,0	2,6	1,8
C 3	67-98	83,9	130,8	0,26	6,6	186,6	1,2	124,9	2,4	1,7
C 4	98+	49,6	171,5	0,26	7,0	322,1	0,5	267,8	3,2	2,7
<b>P2-24</b>										
A 1	0-26	42,8	88,7	0,26	4,6	163,5	0,9	104,6	3,1	2,4
C 2	26-61	48,6	154,0	0,13	6,0	295,3	0,4	362,3	3,3	2,7
C 3	61-69	18,9	177,1	0,13	7,3	288,7	0,5	512,2	2,8	2,6
C 4	69-96+	28,5	183,7	0,13	8,5	277,3	0,3	48,9	2,6	2,3
<b>P3-24</b>										
A 1	0-20	30,3	72,9	0,13	4,3	211,2	1,1	< 0,01	4,9	3,9
C 2	20-58	47,0	114,1	0,13	4,5	348,8	0,6	< 0,01	5,2	4,1
C 2	20-58	21,0	86,1	<0,01	3,9	335,6	0,4	< 0,01	6,6	5,7
C 3	58-82	97,7	165,4	0,13	11,3	259,4	1,2	< 0,01	2,7	1,9
C 4	82-89	28,6	107,5	0,13	6,3	186,6	1,2	< 0,01	2,9	2,5
C 5	89-113	23,3	168,8	<0,01	5,8	357,8	0,6	25,4	3,6	3,3
C 5	113-122+	16,0	197,0	<0,01	7,9	357,8	0,7	35,1	3,1	2,9
<b>P4-24</b>										
Acícula	0-4	36,3	194,6	0,02	5,0	406,1	1,1	254,5	3,5	3,2
A 1	4-9	56,6	190,8	0,04	8,3	317,8	1,6	277,3	2,8	2,4
C 2	9-27	66,9	171,7	0,04	6,8	279,5	0,9	212,1	2,8	2,2
C 3	27-46	68,0	168,5	0,05	7,1	300,1	0,9	211,0	3,0	2,4
C 4	46-74	47,9	181,2	0,08	6,6	341,3	0,4	161,0	3,2	2,7
C 5	63.36	57,1	162,4	0,03	8,4	306,0	0,3	379,5	3,2	2,6
C 6	84-100+	60,7	157,9	0,03	4,9	409,0	0,3	199,0	4,4	3,5

**APÊNDICE 32.** Elementos químicos determinados nos solos construídos da sub-área (SA-2)

Camada	Espe. cm	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S-SO <sub>4</sub>	Ki	Kr
		-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>P1-2</b>										
A 1	0-58	43,5	93,2	0,13	7,0	164,8	0,2	188,1	3,0	2,3
C 2	58-75	52,5	137,4	0,13	6,3	272,9	0,1	170,7	3,4	2,7
C 2	58-75	34,5	150,6	0,13	5,3	286,3	0,0	403,5	3,2	2,8
C 3	75-87	31,7	157,2	0,13	7,1	277,3	0,3	395,9	3,0	2,7
C 3	75-87	47,3	71,8	0,13	5,3	112,4	0,2	324,1	2,6	1,9
C 4	87-100+	45,6	150,6	0,13	6,5	263,9	0,3	323,0	3,0	2,5
<b>P2-2</b>										
A 1	0-16	45,3	99,3	0,13	5,8	191,5	0,5	38,3	3,3	2,6
C 2	16-53	28,7	168,8	0,13	6,1	302,0	0,3	597,4	3,0	2,7
C 3	53-65	66,8	142,3	0,13	5,6	306,4	0,5	605,3	3,7	2,8
C 4	65-89	18,6	180,3	0,00	6,1	304,1	0,4	318,4	2,9	2,7
C 5	89-104	63,6	132,4	0,13	4,5	295,3	0,7	601,9	3,8	2,9
C 6	104-112	46,6	102,6	0,13	4,5	235,4	0,6	451,1	3,9	3,0
C 7	112-118+	47,6	110,9	0,26	4,6	252,7	0,8	412,9	3,9	3,0
<b>P3-2</b>										
A 1	0-14	82,8	160,6	0,00	4,1	351,2	0,7	335,4	3,7	2,8
C 2	14-34	63,1	154,0	0,13	4,5	323,1	0,7	320,8	3,6	2,8
C 3	34-48	50,6	107,5	0,26	4,3	346,7	0,6	386,1	5,5	4,2
C 4	48-61	15,7	119,2	0,00	4,3	337,7	0,4	578,3	4,8	4,4
C 5	61-75+	25,2	109,2	0,13	4,3	308,6	0,6	334,1	4,8	4,2

**APÊNDICE 33.** Elementos químicos determinados nas camadas da coluna geológica

Camada	Espe. cm	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S-SO <sub>4</sub>	Ki	Kr
		-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Coluna Geológica</b>										
C 1	260-450	47,6	144,0	0,13	5,1	266,2	0,3	647,1	3,1	2,6
C 2	450-630	51,8	135,7	0,13	5,1	277,3	1,1	526,4	3,5	2,8
C 3	630-970	15,9	115,8	0,13	5,0	217,0	0,7	536,6	3,2	2,9
C 4	970-995	13,6	218,5	0,00	3,5	322,1	0,8	615,4	2,5	2,4
C 5	995-1095	9,4	102,5	0,13	3,2	151,3	0,4	443,3	2,5	1,6
C 6	1095-1375	19,9	129,0	0,13	5,8	219,6	0,6	66,4	2,9	2,6
C 7	1375-1625	33,0	120,9	0,13	6,3	248,2	4,5	306,0	3,5	3,0
C 8	1625-1675	86,1	132,4	0,13	7,1	268,4	0,7	527,6	3,5	2,4
C 9	1675-1975	37,3	127,5	0,13	6,1	230,5	0,6	577,1	3,1	2,6

**APÊNDICE 34.** Determinação do potencial de acidificação (PA) e de neutralização (PN) dos solos construídos da sub-área (SA-24)

<b>Camadas</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>	<b>PN-PA</b>	<b>PN/PA</b>
	-----kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> -----			
<b>P1-24</b>				
A 1	0,9	4,7	3,8	5,4
C 2	1,2	18,5	17,3	15,9
C 3	1,2	2,6	1,4	2,2
C 3				
C 4	1,5	6,0	4,6	4,1
C 5	1,2	6,0	4,8	5,2
<b>P2-24</b>				
A 1	0,9	1,2	0,3	1,4
C 2	1,5	2,1	0,7	1,4
C 3	1,5	9,4	7,9	6,2
C 4	1,2	9,5	8,3	7,6

**APÊNDICE 35.** Determinação do potencial de acidificação (PA) e de neutralização (PN) dos solos construídos da sub-área (SA-2)

<b>Camadas</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>	<b>PN-PA</b>	<b>PN/PA</b>
	----- kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> -----			
<b>P1-2</b>				
A 1	1,36	8,2	6,84	6,02
C 2	8,77	16,0	7,23	1,82
C 2	4,70	13,2	8,50	2,81
C 3	4,92	12,4	7,48	2,52
C 3	3,51	11,4	7,89	3,25
C 4	5,22	10,7	5,48	2,05
<b>P3-2</b>				
A 1	10,15	8,5	-1,65	0,84
C 2	10,41	14,4	3,99	1,38
C 3	4,83	14,5	9,67	3,00
C 4	2,35	13,6	11,25	5,79
C 5	14,24	14,0	-0,24	0,98