

PROD. TEC. ITV DS-N017/2020

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.17.Fonseca

## **PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS**

### **PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS**

Bernardo Villani Corrêa Fonseca

Sílvio Junio Ramos

Rafael Silva Guedes

Markus Gastauer

Cecílio Caldeira

Wilson Nascimento

Pedro Martins Souza-Filho

Belém / PA

Maio / 2020

<b>Título:</b> Propriedades químicas e físicas do solo em cava de mina e pilha de estéril na mina de Fe em Carajás	
<b>PROD. TEC. ITV DS – N017/2020</b>	Revisão
<b>Classificação:</b> ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( x ) Pública	00

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F676	Fonseca, Bernardo Villani Corrêa.  Propriedades químicas e físicas do solo em cava de mina e pilha de estéril na mina de Fe em Carajás / Bernardo Villani Corrêa Fonseca ... [et al]. -- Belém-PA, 2020. 30 f. : il.  1. Minas a céu aberto. 2. Recuperação do solo. 3. Resistência à penetração do solo. 4. Atributos químicos do solo. I. Ramos, Sílvio Junio. II. Guedes, Rafael Silva. III. Gastauer, Markus. IV. Caldeira, Cecílio. V. Nascimento, Wilson. VI. Souza-Filho, Pedro Martins. VII. Título  CDD.23 ed. 622.34098115
------	---

Bibliotecário(a) responsável :Nisa Gonçalves CRB-2: 525

## RESUMO

As atividades de revegetação de áreas impactadas pela mineração de ferro Fe podem ser prejudicadas por uma série de impedimentos de natureza química e física. Em cavas de mina, os problemas de ordem física, como a resistência à penetração e elevada inclinação podem se sobressair aos de ordem química, de modo que os atributos do solo devem ser considerados nos planos de recuperação dessas áreas. Este estudo teve como objetivo avaliar os principais atributos químicos e físicos que apresentam relação direta com o crescimento radicular nos taludes de cava e de pilhas de estéril, no complexo minerário de ferro de Carajás-PA. Para isso, foram coletadas amostras para caracterização química do solo em taludes de cava e pilhas de estéril, assim como em floresta nativa. Também, foram analisadas características físicas do solo, como densidade e a resistência à penetração em estação seca e chuvosa. Os resultados mostram que os taludes de cava apresentam baixo a médio os teores de P no solo, baixos teores de matéria orgânica e dos micronutrientes B, Zn e Cu. Nos taludes de pilha de estéril, os atributos químicos do solo se mostram menos preocupantes para o crescimento normal de plantas do que nos taludes de cava de mina. A resistência do solo à penetração nos taludes de cava foi maior que em pilhas de estéril e na floresta, no entanto na estação chuvosa houve redução de até 69 % da resistência do solo nos taludes de cava. Os principais problemas de natureza química observados podem ser corrigidos pela adubação, porém é necessário atentar para os elevados níveis de inclinação dos taludes, além da densidade do solo e os riscos de perdas por escoamento superficial, enquanto que a resistência à penetração se mostra um grave problema para o crescimento de raízes das plantas nas cavas em Carajás.

**Palavras-chave:** Minas a céu aberto. Recuperação do solo. Resistência à penetração do solo. Atributos químicos do solo.

## ABSTRACT

Revegetation activities in areas degraded by iron ore mining can be hampered by a number of chemical and physical impediments. In mine pits, physical problems, such as resistance to penetration and high inclination, may stand out from those of a chemical nature, so that soil attributes should be considered in the recovery plans of these areas. This study aimed to evaluate the main chemical and physical attributes that are directly related to root growth in the slopes of pit and piles of waste, in the iron ore mining complex of Carajás-PA. To achieve this objective, samples were collected for chemical characterization of the soil in pit embankments and waste piles, as well as in native forest. Also, physical characteristics of the soil, such as density and resistance to penetration in dry and rainy seasons, were analyzed. The results show that the pit slopes present low to medium levels of P in the soil, low levels of organic matter and micronutrients B, Zn and Cu. In the slopes of the waste heap, the chemical attributes of the soil are less of a concern for normal plant growth than in the pit slopes. The soil resistance to penetration in the pit slopes was higher than in waste piles and in the forest, however in the rainy season there was a reduction of up to 69% of the soil resistance in the pit slopes. The main problems of a chemical nature observed can be corrected by fertilization, however, it is necessary to pay attention to the high levels of inclination of the slopes, in addition to the density of the soil and the risks of losses due to runoff, while the resistance to penetration is shown to be severe. problem for the growth of plant roots in the mine pits in Carajás.

**Keywords:** Open pit mines. Soil recovery. Resistance to soil penetration. Chemical attributes of the soil.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa com a localização das áreas de estudo.....	11
<b>Figura 2</b> - Pilha de Estéril Oeste – WP_O. ....	11
<b>Figura 3</b> - Pilha de Estéril Sul 4 – WP_S4. ....	12
<b>Figura 4</b> - Cava N5W.....	12
<b>Figura 5</b> - Cava N4E.....	13

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Recomendações para atributos químicos adotados para solos agrícolas no estado Pará, segundo Cravo et al. (2010). ..... 15
- Tabela 2** - Umidade gravimétrica na estação chuvosa e densidade em cavas (N5W e N4E) e pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) da mina de Fe e floresta na PMC..... 19

## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD. .... 17
- Gráfico 2** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD.....18
- Gráfico 3** - Distribuição relativa (%) de atributos químicos do solo em cava de mina (N5W e N4E) e pilha de estéril (WP\_O e WP\_S4) em função dos valores de recomendados para solos no estado do Pará (REC) propostos por Cravo et al. (2010) e Tedesco et al. (2004). .... 18
- Gráfico 4** - Resistência a penetração do solo em áreas de cava e floresta a), b) e pilhas de estéril e floresta c), d) em estação seca e chuvosa. Dados apresentados como média de todos os pontos observados em cada área por profundidade. .... 20

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BS	- Saturação por bases
CEC	- <i>Cation Exchange Capacity</i> (Capacidade de Troca Catiônica)
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	- Ferro
IBRAM	- Instituto Brasileiro de Mineração
pH	- potencial Hidrogeniônico
PMC	- Província Mineral de Carajás
RP	- Resistência à penetração

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
2.1	Caracterização das áreas e amostragem .....	10
2.2	Análises químicas do solo.....	14
2.3	Análises físicas do solo .....	15
2.4	Análises estatísticas .....	16
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>16</b>
3.1	Atributos químicos.....	16
3.2	Densidade e resistência a penetração do solo .....	19
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>20</b>
4.1	Atributos químicos.....	20
4.2	Atributos físicos .....	23
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>26</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração para extração de minério de Fe exigem em significativas intervenções no meio ambiente natural, com notável perturbação e alteração nas características do solo.

Após a extração do minério se faz necessário realizar a recuperação ambiental das áreas degradadas ou interferidas. Uma das principais medidas voltadas à recuperação ambiental em áreas de mineração de Fe é a revegetação dos taludes, seja os de corte conformados nas cavas ou os de aterro, resultantes da deposição de materiais excedentes ou estéril.

A recuperação ambiental dessas faces conformadas pela atividade de mineração se dá, principalmente, através de sua revegetação. Ocorre que as atividades de revegetação de taludes de corte e aterro em mineração de Fe tem se demonstrado de grande complexidade, incorrendo em índices não satisfatórios de desenvolvimento e recobrimento vegetal.

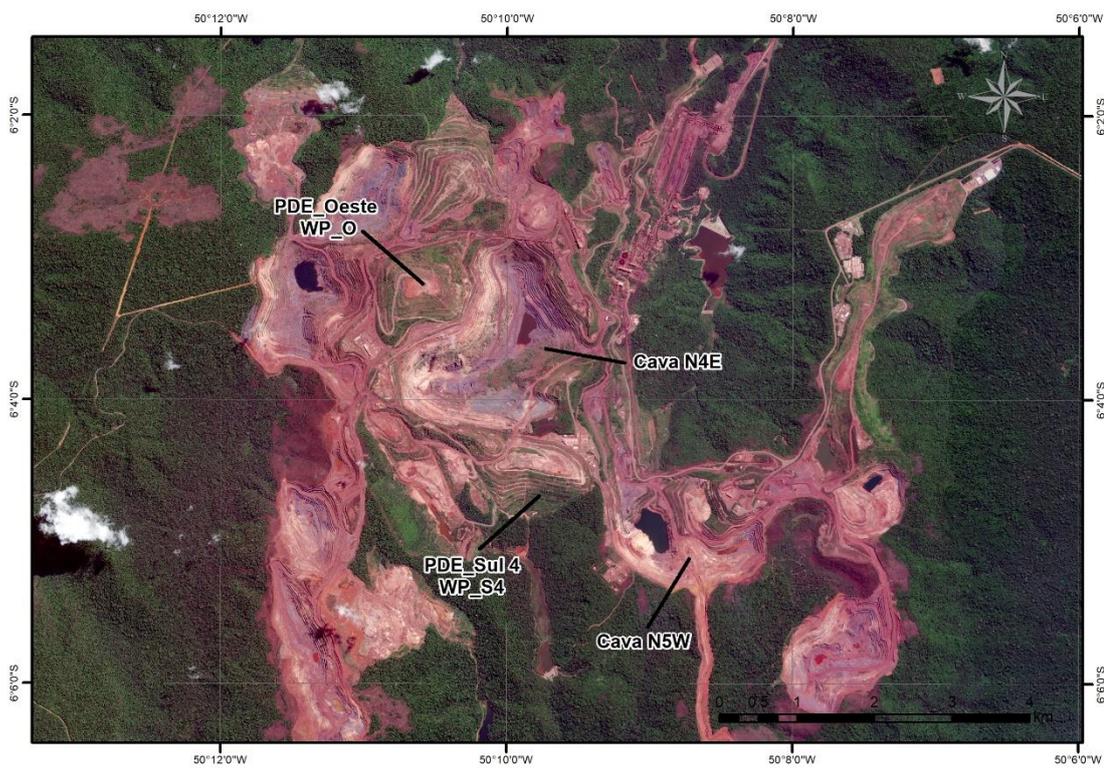
É sabido que as características físicas e químicas do substrato diretamente influenciam no sucesso do recobrimento vegetal. Para melhor entendimento das dificuldades que vêm sendo enfrentadas nas atividades de revegetação de taludes, este trabalho realizou coleta de amostras de solo em variadas áreas no Complexo Minerador de Carajás.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização das áreas e amostragem

O estudo foi desenvolvido na Província Mineral de Carajás, estado do Pará, Brasil, em mina de Fe a céu aberto, compreendendo diversas cavas, das quais vários taludes foram avaliados em duas cavas de mina, assim como duas pilhas de estéril contendo cronossequência de revegetação, sendo a pilha de estéril Oeste denominada de WP\_O, enquanto a pilha de estéril Sul-4 foi identificada nesse estudo como WP\_S4, além de uma área de floresta nativa. As cavas de minas estão situadas em dois platôs de minério de Fe: o platô N5, na face West (N5W), onde foram avaliados dois taludes, e o platô N4, na face *East* (N4E), onde foram avaliados três taludes. As Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam um mapa com a localização e fotos aéreas das áreas de estudo.

**Figura 1 - Mapa com a localização das áreas de estudo.**



Fonte: Vale, 2019

**Figura 2 - Pilha de Estéril Oeste – WP\_O.**



Fonte: Vale, 2019

**Figura 3 - Pilha de Estéril Sul 4 – WP\_S4.**



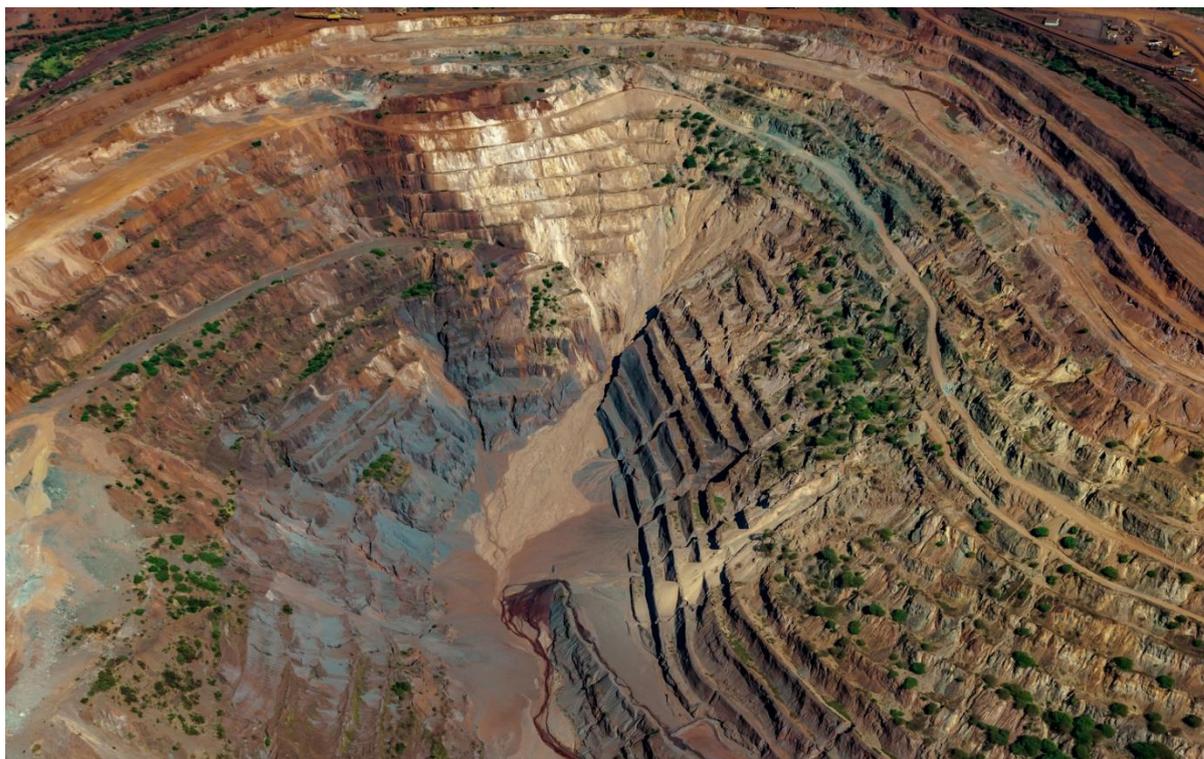
**Fonte:** Vale, 2019

**Figura 4 - Cava N5W.**



**Fonte:** Vale, 2019

**Figura 5** - Cava N4E.



**Fonte:** Vale, 2019

Em ambas as cavas, os taludes apresentam material denso e com forte presença de rochas. As pilhas de estéril foram formadas pelo depósito de resíduos do processo de escavação para retirada do minério e, para a recuperação dessas áreas foram aplicados cerca de  $2 \text{ t ha}^{-1}$  de composto orgânico comercial,  $600 \text{ kg ha}^{-1}$  de NPK 4-14-08,  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  de micronutrientes via FRITAS\_BR12 e adubação de cobertura realizada 60 dias depois do plantio aplicando  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de NPK 20-00-20. Um hidrossemeador foi utilizado para a aplicação dos insumos e realização do semeio com a mix de sementes de espécies nativas e não nativas, incluindo principalmente espécies leguminosas. O grau de inclinação dos taludes de cava e pilhas de estéril variou entre 40 e 82 %, sendo os maiores valores observados nas cavas.

A coleta de amostras de solo em área de floresta nativa para a realização de análises físico químicas teve por objetivo levantar informações a respeito do *background* do ambiente natural da região, de modo a permitir a realização de comparações com os resultados obtidos nas áreas interferidas pela atividade de mineração na PMC.

## 2.2 Análises químicas do solo

As amostras foram coletadas na profundidade de 0-10 cm em pontos equidistantes nos taludes das cavas. O número de amostras variou segundo as dimensões de cada talude, sendo coletadas 49 amostras em N5W e 29 amostras em N4E. Nas pilhas de estéril e floresta foram coletadas amostras em parcelas de 10 x 20 m de modo que, em cada parcela, três amostras compostas foram coletadas, cada uma formada por 5 amostras simples. Assim, na pilha de estéril WP\_O e WP\_S4, 10 e 9 amostras compostas, respectivamente, foram coletadas e em floresta 5 amostras compostas. No total, 102 amostras foram analisadas.

A preparação das amostras para análises químicas incluiu secagem ao ar e peneiramento usando peneiras com 2 mm de abertura. As análises foram realizadas conforme Embrapa (2017): pH em água (solo:solução 1:2,5); K e P disponível foram extraídos em solução Mehlich-1 (Mehlich, 1953), em que o K foi determinado por fotometria de chama e o P determinado por colorimetria;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  trocáveis foram extraídos com KCl 1M, onde  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram determinados por espectrometria de absorção atômica e  $\text{Al}^{3+}$  foi determinado por titulação; a acidez potencial (H+Al) foi determinado via extração com acetato de cálcio 0,5 M e quantificado por titulação. Os teores de Fe, Cu, Zn e Mn disponível foram extraídos em solução DTPA a pH 7,3 e determinado por espectrometria de absorção atômica e B extraído por  $\text{BaCl}_2$  a quente (Camargo et al., 2009). O N total foi extraído pelo método Kjeldahl e o S- $\text{SO}_4^{2-}$  extraído em solução  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  em ácido acético 2M contendo  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  de P e determinado por turbidimetria (Camargo et al., 2009). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada como  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H} + \text{Al}^{3+}$ ; saturação por bases (BS) =  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) \times 100 / \text{CTC}$ . O teor de matéria orgânica é estimado pela concentração de carbono orgânico do solo determinado via combustão úmida (EMBRAPA, 2017) (Tabela 1).

**Tabela 1** - Recomendações para atributos químicos adotados para solos agrícolas no estado Pará, segundo Cravo et al. (2010).

Atributo		Baixo	Médio	Alto
pH*	-	<5,5	5,5-6,0	>6
MO*	dag kg <sup>-1</sup>	<2,6	2,6-5,0	>5,0
P	mg kg <sup>-1</sup>	<5	5-10	>11
K	mg kg <sup>-1</sup>	<40	40-60	>60
Ca	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	<1,5	1,5-3,5	>3,5
Mg	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	<0,5	0,5-1,5	>1,5
B	mg kg <sup>-1</sup>	<0,35	0,35-0,9	>0,9
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	<0,7	0,7-1,8	>1,8
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	<18	18-45	>45
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	<5	5-12	>12
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	<0,9	0,9-2,2	>2,2

\*Valores propostos por Tedesco et al. (2004). Dados em negrito são o limite superior do terço médio de classificação, adotados como referência (Alvarez et al., 1999)

Fonte: Adaptado de Cravo *et al* 2010.

### 2.3 Análises físicas do solo

Para análises de resistência a penetração, foram avaliados perfis de 0 a 10 cm em floresta, taludes de pilhas de estéril e taludes de cavas em dois períodos: estação seca (junho 2019) e estação chuvosa (novembro de 2019). Foram avaliados 22 pontos de amostragem em taludes de cavas, 12 pontos em pilhas de estéril e 9 pontos em floresta na estação seca. Na estação chuvosa foram analisados 30 pontos em taludes de cava, 12 pontos em pilhas de estéril e 6 pontos em floresta, obedecendo uma distância mínima de 10 m e máxima de 50 m entre cada ponto de amostragem.

A resistência à penetração foi avaliada através de um penetrômetro de impacto segundo o método descrito por Stolf et al. (1983). O penetrômetro de ponta em cone expressa os resultados por meio da equação (1) de Stolf, (1991), considerando as características do equipamento utilizado.

$$RP = 2,37 + 3,7(N) \quad (1)$$

Onde, *RP* é a resistência à penetração do solo em kgf cm<sup>-2</sup> e *N* é o número de impactos de peso metálico. Os resultados obtidos em kgf cm<sup>-2</sup> foram multiplicados pela constante 0,0980665 para conversão em Mpa. Em cada ponto de avaliação de *RP* foram coletadas amostras indeformadas para análise de densidade e umidade gravimétrica conforme Embrapa (2017).

## 2.4 Análises estatísticas

Todos as análises foram realizadas em triplicata. Todas as variáveis foram submetidas ao teste LSD de Fisher, quando os dados apresentam homogeneidade de variância, e quando não, um teste Dunnett T3 foi aplicado, sempre analisado a um nível de 95% de confiança. Para as análises utilizou-se a linguagem R, versão 3.5.1 para Windows (R Core Team, 2018). Para a construção dos gráficos, foi utilizado o software SigmaPlot versão 12.0.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Atributos químicos

O pH do solo nos taludes de cava de mina e nas pilhas de estéril variaram entre 5.5 e 6.2 (Gráfico 1), faixa considerada ideal para a disponibilidade de macro e micronutrientes. Esses valores são superiores ao observados para os solos de floresta amostrados em Carajás.

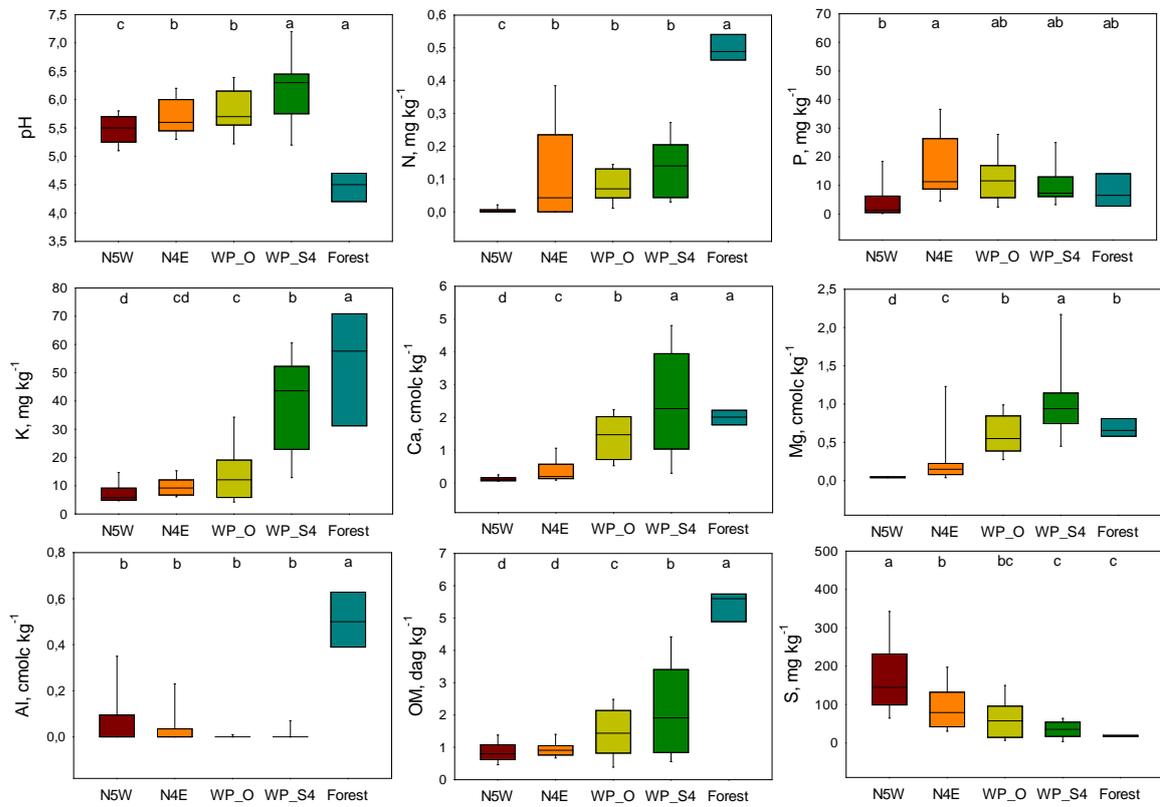
Todas as áreas apresentaram teores de P disponível inferiores a  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ , exceção para a cava N4E (Gráfico 1). Observa-se que nos taludes da mina N5W os teores disponíveis de P correspondem a apenas 25% do recomendado em solos para o crescimento de plantas em solos da região. Mas, os teores encontrados nos taludes da mina N4E são superiores em 20% a esses níveis de referência (Gráfico 1). Os teores de K nas cavas não superaram  $11 \text{ mg kg}^{-1}$ , sendo os maiores valores encontrados nas áreas de floresta. Esses teores são inferiores em até 91 % nos taludes de cavas e 80 % inferiores em pilhas de estéril, quando comparados aos valores recomendados para solos da região. De modo semelhante, observou-se baixos teores de Ca e Mg em ambos os taludes de cavas e pilhas de estéril, os quais encontram-se, respectivamente, 82 a 97 % e 30 e 60 % abaixo dos valores recomendados. Outros elementos, como Al, que se encontra dentro do tolerável para as plantas, e S e Mn, que superaram a recomendação e não representam dificuldades para o processo de revegetação dessas áreas.

O conteúdo de matéria orgânica do solo nos taludes de cava de mina e nas pilhas de estéril foi menor que o encontrado nas áreas de floresta, estando ainda de 60 a 80 % abaixo do recomendado. Essa tendência foi observada também para os

teores de N total nos taludes avaliados. Além disso, CEC e Fe disponível apresentaram maiores valores em floresta.

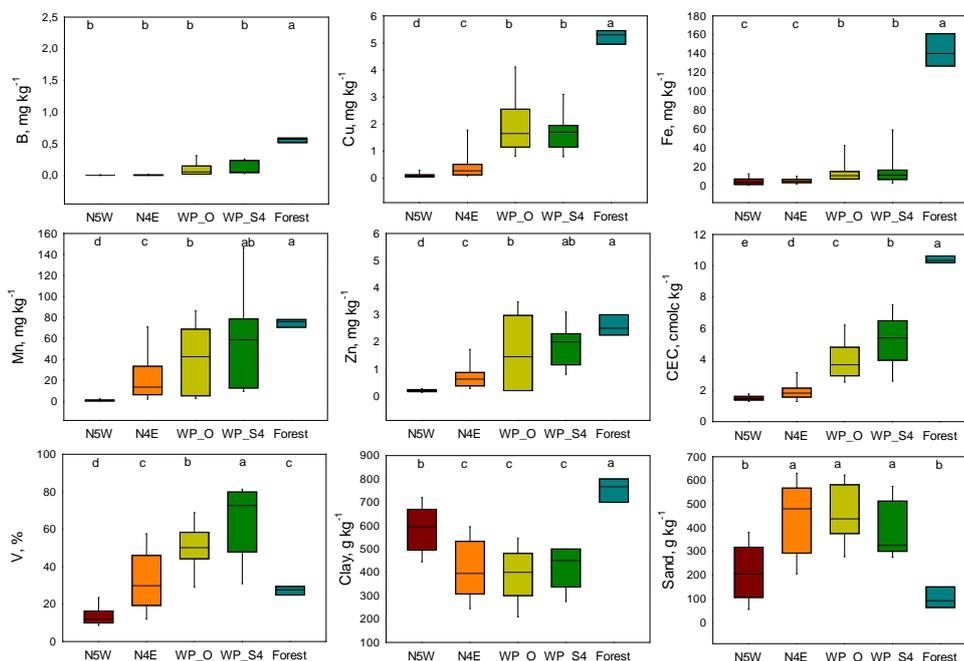
De modo geral, os micronutrientes B, Cu, Zn e Fe disponível nos taludes de cava são menores aos teores encontrados na floresta nativa e, esses estão muito abaixo da recomendação adotada neste estudo (Gráficos 2 e 3).

**Gráfico 1** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD.



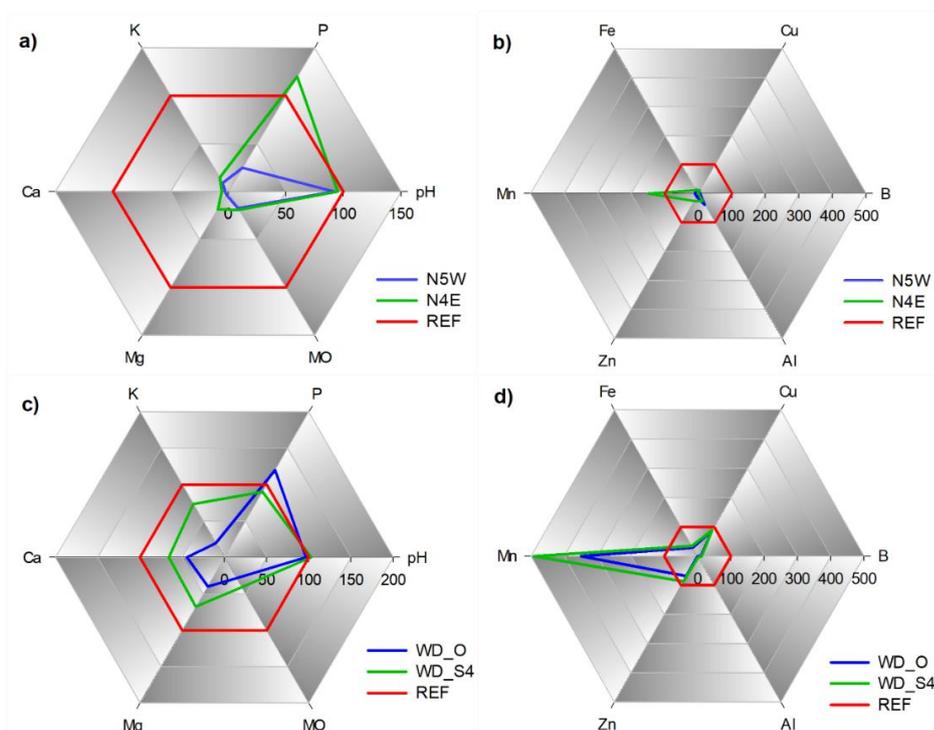
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Gráfico 2** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Gráfico 3** - Distribuição relativa (%) de atributos químicos do solo em cava de mina (N5W e N4E) e pilha de estéril (WP\_O e WP\_S4) em função dos valores de recomendados para solos no estado do Pará (REC) propostos por Cravo et al. (2010) e Tedesco et al. (2004).



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Densidade e resistência a penetração do solo

A densidade do solo foi avaliada na camada de 0 a 10 cm e indicou baixos valores na área de floresta nativa ( $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ ), nas pilhas de estéril apresentam valores que variaram entre  $1,3$  e  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto que em N4E a densidade do solo ( $1,92 \text{ g cm}^{-3}$ ) pode ser considerado um fator preocupante para o processo de revegetação e restauração da área (Tabela 2). Entretanto, na cava N5W, os dados mostram que a densidade do solo ( $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ ) pode não ser o principal problema físico para o desenvolvimento radicular das plantas.

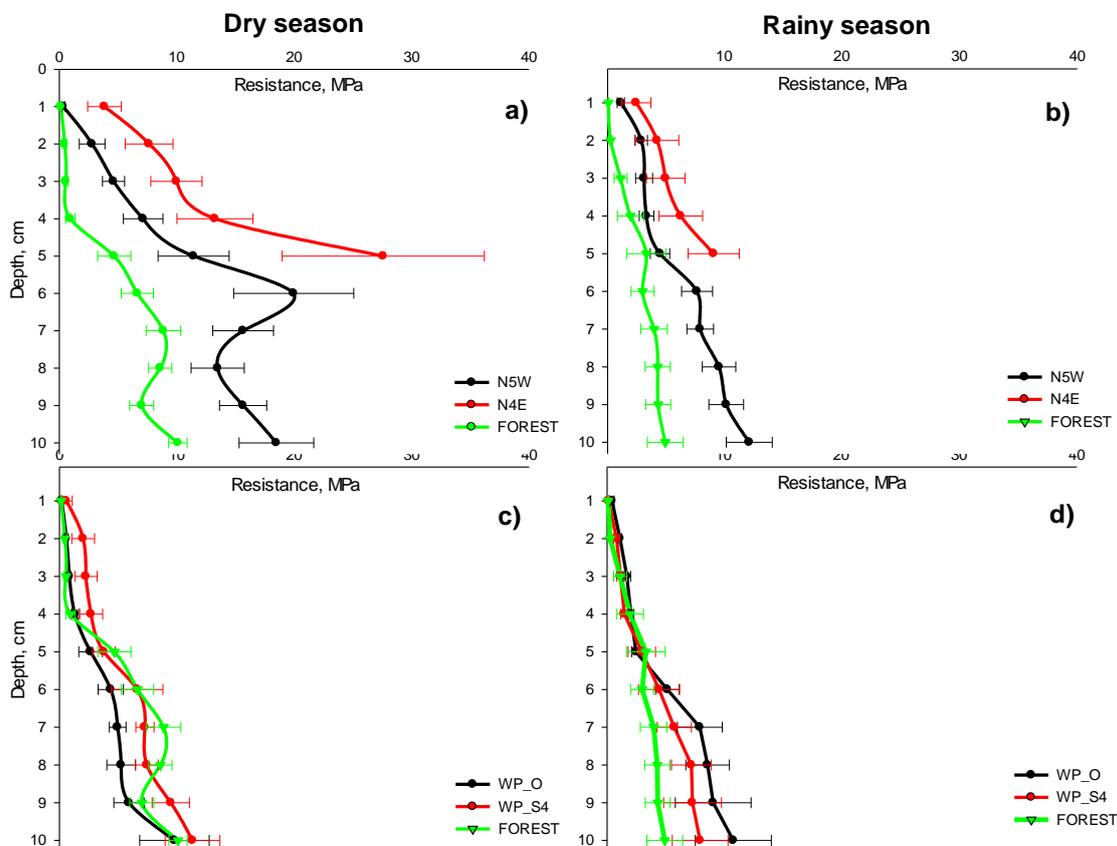
As cavas de mineração também apresentam elevada resistência à penetração das raízes, principalmente na estação seca, com destaque para a cava N4E (média de 28 Mpa) (Gráfico 4). Por outro lado, na estação chuvosa, houve redução de 69% da resistência à penetração nesse talude de cava nos primeiros 5 cm de profundidade. Para essa área, somente foi possível avaliar até 5 cm de profundidade, isso devido à forte presença de material rochoso. Diferentemente, nas pilhas de estéril, foram observados menores valores de resistência à penetração, os quais se aproximam aos encontrados em floresta, tanto em estação seca como chuvosa.

**Tabela 2** - Umidade gravimétrica na estação chuvosa e densidade em cavas (N5W e N4E) e pilhas de estéril (WP\_O e WP\_S4) da mina de Fe e floresta na PMC.

	Umidade ( $\text{g g}^{-1}$ )	Densidade ( $\text{g dm}^{-3}$ )
N5W	0,18	1,54
N4E	0,08	1,95
WP_O	0,14	1,27
WP_S4	0,19	1,58
Forest	0,28	1,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Gráfico 4** - Resistência a penetração do solo em áreas de cava e floresta a), b) e pilhas de estéril e floresta c), d) em estação seca e chuvosa. Dados apresentados como média de todos os pontos observados em cada área por profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos químicos

O pH do solo é um dos atributos mais importantes para o processo de recuperação de áreas degradadas e pode ser um agravante por causar a baixa disponibilidade de nutrientes (TOUCEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017). No presente estudo, as áreas avaliadas não apresentam limitações quanto a acidez do solo, a qual variou dentro da faixa ideal para a disponibilidade da maioria dos macro e micronutrientes (ALVAREZ *et al.*, 1999). Esses valores de pH estiveram acima do observado em ambiente de floresta nativa, entretanto é importante destacar que em floresta, mesmo com um solo ácido, um conjunto de fatores pode contribuir para a disponibilidade de nutrientes, como maior matéria orgânica, atividade microbiana, exsudados radiculares, além outros fatores como microclima próprio para o

desenvolvimento das espécies nativas (FUJITA *et al.*, 2019; JING *et al.*, 2020). Neste ambiente, a decomposição da serapilheira, associada a elevada temperatura e umidade é responsável pelo fornecimento de nutrientes ao solo, permitindo o desenvolvimento de uma vegetação sem sintomas de deficiência nutricional, em um solo naturalmente pobre (QUESADA *et al.*, 2011).

A disponibilidade de P nas áreas mineradas variou entre baixa a alta (CRAVO *et al.*, 2010), indicando a necessidade de reposição deste nutriente nos locais de menor disponibilidade para atingir o valor de referência em alguns ambientes. As formações ferríferas podem conter minerais fosfatados (UPADHYAY; ASOKAN; VENKATESH, 2011), entretanto a disponibilidade de P pode ser extremamente baixa, porque este elemento pode estar associado a estrutura cristalina dos minerais ou, quando liberado pelo intemperismo para a solução do solo, pode ser adsorvido nos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (FINK *et al.*, 2016). Por este motivo, uma forma de aumentar a eficiência de aproveitamento do P do solo pode ser a aplicação de compostos orgânicos que retardem a retenção de fosfatos aplicados ao solo via fertilizante, bem como o uso de fontes de liberação lenta (FERTAHY *et al.*, 2019).

Baixos teores de Ca e Mg foram encontrados nos taludes de cava e pilhas de estéril (CRAVO *et al.*, 2010), principalmente nas cavas, onde foi encontrada maior diferença para os valores de referência. Esses baixos teores de Ca e Mg encontrados nos taludes, se devem ao material parental, que dá origem a solos naturalmente pobres em Ca e Mg, fato que se confirma na maior parte dos solos da região amazônica (QUESADA *et al.*, 2011). As minas de Fe em Carajás se situam na Bacia Carajás onde ocorrem rochas metavulcano-sedimentares e similares, compostas principalmente de Metabasalto, Metarriolito e Metadacito (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008), que apesar de conter o Ca e Mg na estrutura mineral, esses elementos não se encontram disponíveis às plantas. Isso reforça a necessidade de fornecimento de Ca e Mg, principalmente por meio de fontes menos solúveis, uma vez que tanto as áreas de cavas de mina como pilhas de estéril apresentam alta inclinação e isso pode favorecer a erosão e perda de nutrientes por escoamento superficial e lixiviação.

Diferentemente dos taludes de cava, as pilhas de estéril são áreas de maior facilidade de manejo (maior facilidade de plantio, fertilização e manutenção de plantas) e, por isso, se distanciam menos dos valores de referência. As pilhas de estéril apresentam maiores teores de Ca e Mg devido à calagem realizada no início

do processo de revegetação. Esses resultados demonstram que a prática de calagem foi eficiente para aumentar os valores desses elementos nessas áreas, equiparando aos valores observados em áreas de floresta. De maneira geral, os taludes nas pilhas de estéril apresentam menor grau de inclinação, favorecendo as operações de correção do solo. Por outro lado, os taludes nas cavas podem atingir mais de 80 % de inclinação e representam um desafio para as práticas de preparo do solo, causando grandes perdas, não apenas de fertilizantes, mas também de sementes e plântulas. Como forma de minimizar as perdas na revegetação de áreas muito inclinadas, Zhao *et al.* (2018), realizaram plantio de mudas utilizando técnica denominada “*container seedling*” e observou expressivos aumentos na cobertura do solo de encostas de estradas, aumentando a eficiência de aproveitamento de água e fertilizantes. Segundo Chirino *et al.* (2008), o uso desta técnica permite o maior desenvolvimento de raízes e observaram ganhos na condutância hidráulica das raízes de plantas usadas no reflorestamento mesmo que plantadas em condições áridas.

Os baixos teores de K nas em cavas e pilhas de estéril se relacionam diretamente com a formação geológica da Bacia de Carajás baixa ocorrência de rochas graníticas ou granitoides (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008). Mesmo quando aplico ao solo, os teores de K tendem a ser baixos devido a elevada mobilidade do elemento no solo, o qual é fracamente retido no solo por adsorção eletrostática (EICK *et al.*, 1990). Isso dificulta o manejo de fertilização, exigindo aplicações fracionadas, tendo em conta não apenas a possibilidade de perdas do elemento, mas também as necessidades fisiológicas da planta e o balanceamento com outros nutrientes (DAS *et al.*, 2019).

Tanto taludes de cava como pilhas de estéril, acumulam menos matéria orgânica que as áreas de floresta avaliadas. Esse fato ocorre porque são escassas as fontes de matéria orgânica nas áreas mineradas, principalmente nos taludes inclinados de cava de mina. Também, as áreas de floresta apresentaram maiores teores de N no solo, assim como CTC, B e Fe disponíveis, o que confirma a importância da matéria orgânica para o fornecimento de nutrientes e disponibilidade de micronutrientes. Segundo Dunalska *et al.* (2012), a matéria orgânica possui relação direta com o teor de N do solo e pode ser a principal fonte deste nutriente em ambientes não antropizados, principalmente em condições de elevadas temperaturas. Do mesmo modo, a matéria orgânica pode ter grande influência na CTC do solo,

devido ao elevado número de cargas livres em superfície de suas estruturas (ZHAO *et al.*, 2019).

Em síntese, os atributos químicos dos taludes nas pilhas de estéril e, principalmente nas cavas, apresentaram limitações para a revegetação, como baixo Ca, Mg, matéria orgânica e micronutrientes, e que associado ao grau de inclinação das áreas, podem dificultar a recuperação dos taludes de cava de mina. Poucos trabalhos publicados mostram sucesso na revegetação de taludes de cava de mina, por exemplo (PINTO *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2018), em que o plantio em covas aumentou o aproveitamento de fertilizantes e evitou a perdas de plantas por enxurrada. Além disso aplicação de hidrogel nas covas em taludes mostrou aumentar a eficiência de uso da água e facilitar o crescimento radicular (MILLER; NAETH, 2019). Para os taludes em pilhas de estéril, pesquisas apontam soluções para a recuperação desse ambiente, como adubação e semeio por hidrossemeadura, a proteção imediata do solo com aplicação de diversas combinações de mulches e fibras para a fixação de sementes e fertilizantes no solo (FIELDS-JOHNSON *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2019).

## **4.2 Atributos físicos**

Os maiores valores de densidade em pilhas de estéril em relação à floresta podem estar associado ao processo de formação das pilhas de estéril, as quais são formadas por material desagregado, que durante o empilhamento sofrem compactação por máquinas e este material, com o tempo, tende a se rearranjar, causando o aumento da densidade (VEIGA *et al.*, 2007). Apesar disso, a densidade de solo nos taludes nas pilhas de estéril parece não comprometer a revegetação, uma vez que espécies herbáceas, arbustos e arbóreas formam a vegetação nativa e são facilmente encontradas cobrindo o solo nessas áreas. Nos taludes da cava, onde foram observados os maiores valores de densidade do solo, é possível que o impedimento físico seja um dos causadores do menor desenvolvimento de raízes das plantas e, conseqüentemente, isso possa afetar negativamente o processo de revegetação. Segundo Reinert *et al.* (2008), densidade do solo maiores que 1,85 g cm<sup>-3</sup> podem causar sérias restrições ao crescimento radicular e reduções no desenvolvimento de diversas espécies. Até o momento não há maneiras rápidas e eficientes para reduzir a densidade do solo em áreas de elevada inclinação, entretanto

espera-se que com o avanço do processo de recuperação das áreas, o desenvolvimento de raízes, o aumento da atividade microbiana e a incorporação de matéria orgânica favoreça a redução da densidade do solo (ASENSIO *et al.*, 2013). Nestes casos, a bioturbação provocada pelo desenvolvimento de raízes se mostra fundamental (COLOMBI; KELLER, 2019).

A densidade do solo em área de floresta, pode estar sendo condicionado pela maior quantidade de matéria orgânica e, possivelmente, pela maior atividade microbiana neste ambiente, fundamental para a estruturação e agregação do solo (DULTZ *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2017). Desta maneira, o baixo teor de matéria orgânica encontrado nos taludes da cava de mina e pilhas de estéril pode ser considerada um problema. As áreas de cava de mina são ambientes escavados que normalmente possuem baixos teores de matéria orgânica, enquanto que as pilhas de estéril são provenientes de diferentes materiais, os quais foram revolvidos, facilitando a oxidação da matéria orgânica (ONDRASEK *et al.*, 2019). Portanto, é fundamental que o manejo de recuperação dessas áreas considere a necessidade de adição/incorporação de matéria orgânica, como forma de melhorar o condicionamento não apenas químico, mas também físico do solo. No entanto, devido a inclinação dos taludes nas cavas de mina e a dificuldade de fixação e estabelecimento de plantas nessas áreas, aumentar o teor de matéria orgânica pode ser um grande desafio.

A resistência à penetração nos taludes de cava atingiu valores acima de 10 MPa e são considerados como extremamente elevados para solos (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Assim, nas condições de solo seco ou baixa umidade nas cavas, a partir de 1 cm de profundidade já há forte impedimento ao desenvolvimento radicular e, a 5 cm de profundidade a resistência à penetração possivelmente inviabiliza o crescimento da maioria das espécies utilizadas atualmente nas atividades de revegetação. A partir de 3 MPa podem ocorrer sérias restrições ao crescimento de raízes, causando alterações morfológicas e forçando o desenvolvimento superficial de raízes no solo, conseqüentemente, limita a absorção de água e nutrientes na superfície do solo, e aumenta a susceptibilidade ao déficit hídrico (COLOMBI *et al.*, 2018). Por outro lado, com o aumento da umidade do solo em função do início do período chuvoso na região, foi observada redução dos valores de resistência à penetração nos taludes de cava estudados, os quais se aproximaram dos valores observados em solo de floresta na estação seca. Além de fatores como

argila, matéria orgânica e mineralogia, a umidade do solo é apontada como outro fator que afeta a resistência à penetração no solo, uma vez que altera a coesão entre partículas do solo, de modo que quando o solo está seco ou com baixa umidade, há uma aproximação de partículas que dificulta sua separação por forças externas (BELTRAME *et al.*, 1981). Assim, com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, incorrendo em redução da resistência a deformações e a penetrações (DUNCAN *et al.*, 2014). O resultado encontrado no presente estudo sugere que há uma necessidade de manutenção de níveis de umidade adequados nessas áreas, para que as práticas de revegetação tenha maior sucesso, considerando o impedimento físico que existe no local.

A menor resistência a penetração observada nos taludes pilhas de estéril, em relação às cavas, se deve em parte à pouca estrutura do solo (ainda em fase de consolidação). A estrutura do solo é também considerada um fator determinante para a resistência do solo, e em caso de materiais pouco estruturados e pouco coesos, há uma tendência que essa resistência seja menor (GÜLSER; CANDEMIR, 2012). Apesar disso, a resistência do solo a partir de 5 cm de profundidade é considerada elevada (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996), o que não necessariamente representa um problema para as espécies nativas, uma vez que esses valores são observados em níveis semelhantes na área de floresta nativa. Além disso, a elevada resistência nas pilhas de estéril pode estar relacionada à forte presença de pequenos fragmentos rochosos, que pode não afetar o crescimento radicular, tendo em vista a capacidade das raízes em contornar esses pontos de resistência, além de alterar sua arquitetura radicular (CHEN *et al.*, 2014).

De modo geral, os problemas de ordem física não são facilmente manejáveis nos taludes de cava de mina, principalmente devido à inclinação dos taludes. Além disso, é preciso considerar que os taludes apresentam elevado risco para as atividades de revegetação, por exemplo, coveamento, aplicação de insumos, sementes e mudas. Por outro lado, com o controle de umidade é possível reduzir a resistência a penetração do solo, minimizando os efeitos da densidade, e isso pode facilitar o desenvolvimento de espécies para a revegetação nos taludes de cava de mina. Para isso, a implantação de sistemas de irrigação pode ser uma alternativa viável não apenas para o fornecimento de água às plantas, mas também para reduzir

a resistência do solo. A disponibilidade de água às plantas permite o maior desenvolvimento radicular e o acesso a regiões mais profundas do solo (COLOMBI *et al.*, 2018), de modo que pode garantir maior cobertura do solo, estabilidade do terreno, e em estações secas, maior taxa de sobrevivência das espécies implantadas.

## **5 CONCLUSÕES**

Os problemas de natureza química do solo observados tanto em cavas de mina como em pilhas de estéril, podem ser corrigidos com simples fertilização, entretanto a disposição e inclinação dos taludes, principalmente taludes de corte pode tornar mais difícil a aplicação de técnicas de correção de solo, como calagem e fertilização ou até mesmo o plantio. As cavas de mina apresentaram baixo teor de matéria orgânica, macronutrientes como Ca, Mg, K e N, além de micronutrientes como B, Zn e Cu. Esses elementos podem ser aplicados ao solo juntamente com o plantio, porém é necessário que haja mecanismos de proteção de solo e plantas para conter as perdas por escorrimento superficial e permitir o armazenamento dos insumos, favorecendo o desenvolvimento vegetal. Para isso, um sistema de plantio em covas ou containers também pode ser eficiente em áreas de elevada inclinação (ZHAO *et al.*, 2018).

Apesar dos elevados valores de resistência em pilhas de estéril, não são esperados significativos efeitos negativos sobre o desenvolvimento radicular das espécies nativas usadas para o manejo de recuperação dessas áreas. Entretanto, as cavas de mina apresentam elevada densidade e elevada resistência a penetração das raízes, o que pode ser um dos principais impedimentos para revegetação dessas áreas. Este é um problema cuja solução é altamente dependente da sazonalidade das chuvas, porém é possível que a aplicação de lâminas adequadas de irrigação possa reduzir a resistência do solo.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. H., *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. *In*: RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (EDS.). **Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais - 5° Aproximação**. CFSEMG, Viçosa, p. 359. 1999
- ASENSIO, V. *et al.* Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. **Chemosphere**, v. 90, p. 603–610. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.08.050>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. *In*: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for Assessing of Soil Quality**. **Soil Science Society of American/American Society of Agronomy**, Madison, p. 123–141. 1996.
- CAMARGO, O. A. *et al.* Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC, **Technical Bulletin**. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas. 2009.
- CHEN, Y. L. *et al.* Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. **F. Crop. Res.**, v. 165, p. 61–70. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>. Acesso em: 20 jan. 2020
- COLOMBI, T. *et al.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Sci. Total Environ**, v. 626, p. 1026–1035. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>. Acesso em: 20 jan. 2020
- COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. **Soil Tillage Res.** v. 191, p. 156–161. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>. Acesso em: 20 jan. 2020
- CRAVO, M. S. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará**, 1. ed. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. 2010.
- DAS, D. *et al.* Potassium supplying capacity of a red soil from eastern India after forty-two years of continuous cropping and fertilization. **Geoderma**, v. 341, p. 76–92. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.041>. Acesso em: 20 jan. 2020
- DULTZ, S. *et al.* Impact of organic matter types on surface charge and aggregation of goethite. **Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.**, v. 554, p. 156–168. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.040>. Acesso em: 20 jan. 2020
- DUNALSKA, J. A. *et al.* Effect of temperature on organic matter transformation in a different ambient nutrient availability. **Ecol. Eng.** v. 49, p. 27–34. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.023>. Acesso em: 20 jan. 2020

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**, 2nd Ed., John Wiley & Sons. 2014

EICK, M. J. *et al.* Analyses of Adsorption Kinetics Using a Stirred-Flow Chamber: II. Potassium-Calcium Exchange on Clay Minerals. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 54, p. 1278–1282. 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050013x>. Acesso em: 20 jan. 2020

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**, 3. ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017

FERTAHI, S. *et al.* New generation of controlled release phosphorus fertilizers based on biological macromolecules: Effect of formulation properties on phosphorus release. **Int. J. Biol. Macromol.** 2019 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.12.005>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FIELDS-JOHNSON, C. W. *et al.* Forest restoration on steep slopes after coal surface mining in Appalachian USA: Soil grading and seeding effects. **For. Ecol. Manage.**, v. 270, p. 126–134. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.018>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FINK, J. R. *et al.* Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, p. 1–8. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.201500017>. Acesso em: 20 jan 2020.

FUJITA, K.; MIYABARA, Y.; KUNITO, T. Microbial biomass and ecoenzymatic stoichiometries vary in response to nutrient availability in an arable soil. **Eur. J. Soil Biol.**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.12.005>. Acesso em: 20 jan 2020.

GÜLSER, C.; CANDEMIR, F. Changes in penetration resistance of a clay field with organic waste applications. **Eurasian J. Soil Sci.**, v. 1, p. 16–21. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.18393/ejss.03364>. Acesso em:

JING, X. *et al.* Soil microbial carbon and nutrient constraints are driven more by climate and soil physicochemical properties than by nutrient addition in forest ecosystems. **Soil Biol. Biochem.**, v. 141, p. 107657. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107657>. Acesso em: 20 jan. 2020.

LIU, G. *et al.* Effects and mechanisms of erosion control techniques on stairstep cut-slopes. **Sci. Total Environ.**, v. 656, p. 307–315. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.385>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH<sub>4</sub>, North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of N. Carolina, 1953.

MILLER, V. S., NAETH, M. A. Hydrogel and Organic Amendments to Increase Water Retention in Anthrosols for Land Reclamation. **Appl. Environ. Soil Sci.** p. 1–11.

2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/4768091>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ONDRASEK, G. *et al.* Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. **Sci. Total Environ.**, v. 658, p. 1559–1573. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.243>. Acesso em: 20 jan. 2020.

PINTO, J. R. *et al.* Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. **For. Ecol. Manage.**, v. 261, p. 1876–1884. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.010>. Acesso em: 20 jan. 2020.

QIN, H. *et al.* Intensive management decreases soil aggregation and changes the abundance and community compositions of arbuscular mycorrhizal fungi in Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests. **For. Ecol. Manage.**, v. 400, p. 246–255. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.003>. Acesso em: 20 jan. 2020.

QUESADA, C. A. *et al.* Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, p. 1415–1440. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>. Acesso em: 20 jan. 2020.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reinert, D.J., Albuquerque, J.A., Reichert, J.M., Aita, C., Andrada, M.M.C., 2008. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805–1816. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>. Acesso em: 20 jan. 2020.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Rev. Bras. Cienc. do Solo**, v. 15, p. 229–235. 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf: recomendação para seu uso. **STAB 1**, p. 18–23. 1983.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**, 10. ed. Porto Alegre: SBSCS - Sociedade Brasileira de Ciência Do Solo; Núcleo Regional Sul, 2004.

TOUCEDA-GONZÁLEZ, M. *et al.* Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings. **J. Environ. Manage.** 186, 301–313. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.019>

UPADHYAY, R. K.; ASOKAN, S.; VENKATESH, A. S. Mode of occurrence of phosphorus in iron ores of eastern limb, Bonai Synclinorium, eastern India. **J. Geol. Soc. India**, v. 77, p. 549–556. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12594-011-0054-z>. Acesso em: 20 jan. 2020.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG**: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. CPRM, Belém. 2008.

VEIGA, M. *et al.* Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Tillage Res.**, v. 92, p. 104–113. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2006.01.008>. Acesso em: 20 jan. 2020

ZHAO, X. *et al.* Revegetation using the deep planting of container seedlings to overcome the limitations associated with topsoil desiccation on exposed steep earthy road slopes in the semiarid loess region of China. **L. Degrad. Dev.**, v. 29, p. 2797–2807. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2988>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ZHAO, Z. *et al.* Evolution of soil surface charge in a chronosequence of paddy soil derived from Alfisol. **Soil Tillage Res.**, v. 192, p. 144–150. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.011>. Acesso em: 20 jan. 2020.