

ALINE GONÇALVES SPLETOZER

**AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS  
DE MINERAÇÃO DE BAUXITA NA ZONA DA MATA DE  
MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S761a Sletozer, Aline Gonçalves, 1995-  
2018 Avaliação do escoamento superficial em áreas de mineração  
de bauxita na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil / Aline  
Gonçalves Sletozer. – Viçosa, MG, 2018.  
xv, 82 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Herly Carlos Teixeira Dias.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 73-82.

1. Hidrologia florestal. 2. Bauxita - Minas e mineração.  
3. Recuperação de terra. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.91165

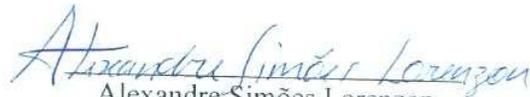
ALINE GONÇALVES SPLETOZER

**AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS  
DE MINERAÇÃO DE BAUXITA NA ZONA DA MATA DE  
MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do programa de Pós-Graduação  
em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

APROVADA: 16 de julho de 2018.

  
Aurora Yoshiko Sato Dias

  
Alexandre Simões Lorenzon

  
Herly Carlos Teixeira Dias  
(Orientador)

À minha mãe Roseli pelo incentivo e apoio nesta conquista, mas principalmente pelo amor, pelo exemplo e por ser meu alicerce. Ao meu pai José Carlos (*in memoriam*), que não pode estar presente neste momento, mas esteve sempre em meus pensamentos. Saudades eternas!

Dedico!

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por nunca ter me deixado desistir, sempre me iluminando e protegendo.

À minha família: mãe e pai, irmãos, vô e vó, tios (as) e primos (as). Agradecimento especial à minha mãe Roseli pela motivação e amor, que mesmo com tantas dificuldades nunca deixou de me apoiar. Ao meu pai José Carlos (*in memoriam*), que não pôde estar presente neste momento tão feliz para mim, mas esteve sempre em meus pensamentos como exemplo de vida. À minha vó Rosa, que sempre fez orações por mim. Ao meu padrasto José e ao meu irmão Amilton pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade concedida para a realização do curso de Mestrado. Ao Laboratório de Hidrologia Florestal pelo suporte, e aos funcionários: Alexandre, Dilson, Chiquinho, Machado e Edna por estarem sempre dispostos a ajudar.

Ao Prof. Herly Carlos Teixeira Dias, pela orientação e incentivo, concedendo esta oportunidade para minha formação. Aos professores: Júlio Cezar Lima Neves, Laércio Antônio Gonçalves Jacovine, Sebastião Martins Filho, José Cola Zanuncio, Eduardo Euclides de Lima e Borges, Igor Rodrigues de Assis e Alexandre Simões Lorenzon, e doutorandos Nero Lemos Martins de Castro, Getulio Fonseca Domingues e mestrando Pedro Mota, que contribuíram com ensinamentos para minha formação de mestrado.

À Companhia Brasileira de Alumínio pelo apoio financeiro e logístico e pela concessão de acesso à área de estudo, em especial ao Geraldo Sergio Werneck e Christian Andrade pela parceria.

À equipe da CBA que auxiliou no meu trabalho lá. Geraldo Sérgio, Aldo, Márcio e Wellington que forneceram informações sobre as áreas das minas e ficavam sempre felizes em me fornecer equipamentos e ajuda quando necessário. Aos demais Rodrigo Cruzeú, Douglas, Edmilson, Edson, Renato, Fábio Júnior, Marcelo, Diego, Thiago Rezende, Érica, Márcio, Vanessa, Jorge e Mota e todos os demais colaboradores da empresa envolvidos.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem prontamente o convite e por contribuírem com este trabalho com valiosas sugestões.

Aos colegas da Pós-graduação: João Paulo, Luiz, Rodolfo, Sérgio e Túlio pela colaboração. Em especial ao Lucas pela coleta e disponibilização dos dados iniciais desta pesquisa e ao Sérgio pela amizade.

Ao estagiário Yuji pela ajuda, dedicação e zelo na coleta de dados.

À Naiara e aos técnicos Claudio e Evandro do laboratório de Física do solo do Departamento de solos pelas ajudas nas análises de solo e ao professor Igor por autorizar o uso do laboratório e dos equipamentos.

A todos os professores do curso de Engenharia Florestal da Universidade do Estado do Mato Grosso pelos ensinamentos e por contribuírem na minha formação. Em especial as professoras Célia Regina Araújo Soares Lopes e Lucirene Rodrigues pela primeira orientação de iniciação científica de 2013 a 2017, por transmitir seus conhecimentos que contribuíram para meu amadurecimento tanto profissional quanto pessoal, além de me incentivar à continuar na pesquisa.

Ao meu melhor amigo e namorado Cleiton, companheiro para toda hora. Obrigada por todos os momentos alegres que me proporcionou, pelo amor e carinho nesses cinco anos juntos.

Às companheiras de república Naiara e Gabi e amiga Cátia pela amizade e incentivo. Ao meu amigo Abelardo pela grande amizade iniciada na disciplina de estatística e pelo incentivo nessa jornada.

A todos os meus amigos de infância, da graduação, da pós-graduação e da igreja pelo incentivo e amizade!

À Sociedade de Investigações Florestais pela administração das finanças.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

Enfim, sou grata a todas as pessoas que me apoiaram e ajudaram. A todos meu muito obrigada!

## SUMÁRIO

LISTAS DE TABELAS .....	vii
LISTAS DE FIGURAS .....	viii
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
<b>Capítulo 1 - Escoamento superficial na reabilitação inicial após mineração de bauxita.....</b>	<b>3</b>
Resumo .....	3
Abstract.....	4
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	6
2.1. Localização e caracterização da área de estudo.....	6
2.2. Escoamento superficial .....	9
2.3. Fatores que interferem no escoamento superficial.....	13
2.3.1. Características da precipitação .....	13
2.3.2. Cobertura vegetal.....	14
2.3.3. Rugosidade da superfície do solo .....	14
2.3.4. Atributos do solo .....	15
2.3.4.1. Física do solo .....	15
2.3.4.2. Química do solo.....	16
2.3.4.3. Infiltração de água no solo.....	16
2.3.4.4. Resistência mecânica do solo à penetração .....	17
2.4. Análises estatísticas .....	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
3.1. Escoamento superficial .....	20
3.2. Precipitação.....	23
3.3. Cobertura de vegetação.....	24
3.4. Rugosidade da superfície .....	29
3.5. Atributos do solo.....	30
3.5.1. Física do solo .....	30
3.5.2. Química do solo.....	32
3.5.3. Resistência mecânica do solo à penetração .....	33
3.5.4. Infiltração de água no solo.....	37
3.6. Coeficiente de correlação e análise de componentes principais .....	39

4. CONCLUSÃO .....	42
<b>Capítulo 2 - Escoamento superficial em dois períodos de reabilitação de mina de bauxita no sudeste de Minas Gerais, Brasil .....</b>	<b>43</b>
Resumo .....	43
Abstract.....	44
1. INTRODUÇÃO .....	45
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	46
2.1. Área de estudo .....	46
2.2. Escoamento superficial .....	47
2.3. Fatores que interferem no escoamento superficial.....	50
2.3.1. Características da precipitação .....	50
2.3.2. Cobertura vegetal.....	51
2.3.3. Serapilheira.....	51
2.3.4. Atributos do solo .....	52
2.3.4.1. Físicas do solo .....	52
2.3.4.2. Química do solo.....	52
2.3.4.3. Infiltração de água no solo.....	52
2.3.4.4. Resistência mecânica do solo à penetração .....	53
2.4. Análises estatísticas .....	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
3.1. Escoamento superficial e precipitação em um ano de monitoramento.....	55
3.2. Precipitação e escoamento superficial aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação .....	56
3.3. Cobertura de vegetação.....	59
3.4. Serapilheira .....	59
3.5. Infiltração de água no solo.....	61
3.6. Química do solo .....	62
3.7. Física do solo .....	64
3.8. Resistencia mecânica do solo à penetração .....	65
3.9. Coeficientes de correlação e análise de componentes principais .....	68
4. CONCLUSÃO .....	71
CONCLUSÃO GERAL .....	72
REFERÊNCIAS .....	73

## LISTAS DE TABELAS

### Capítulo 1

- Tabela 1. Área e inclinação das parcelas coletoras de escoamento superficial antes da mineração e na reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil..... 12
- Tabela 2. Precipitação, escoamento superficial e coeficiente de escoamento observados antes da mineração e na reabilitação inicial e modelo ajustado na reabilitação inicial usando a precipitação de antes da mineração com o escoamento superficial estimado..... 21
- Tabela 3. Características da vegetação antes da mineração (março de 2017) e na reabilitação inicial (março e maio de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil ..... 28
- Tabela 4. Propriedades físicas na profundidade de 0-10 cm do solo antes da mineração (março de 2017) e do substrato na reabilitação inicial (março de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil ..... 30
- Tabela 5. Parâmetros químicos do solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm antes da mineração (março de 2017) e na reabilitação inicial (março de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil ..... 32
- Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson ( $r^2$ ) e  $p$ -valor ( $<0,05$ ) entre o escoamento superficial e as variáveis de precipitação antes da mineração e durante a reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil ..... 39

### Capítulo 2

- Tabela 1. Área de projeção das copas (APC), diâmetro do fuste ( $dap$ ) e área basal (AB) das árvores de eucalipto aos 2,5 (fevereiro de 2017) e aos 3,5 anos (fevereiro de 2018) de reabilitação após mineração de bauxita, no município de Miráí, Minas Gerais, Brasil.. 59
- Tabela 2. Parâmetros químicos do solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos de reabilitação (março de 2018) no município de Miráí, Minas Gerais, Brasil..... 63
- Tabela 3. Propriedades físicas do solo na profundidade de 0-10 cm aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos (março de 2018) de reabilitação após mineração no município de Miráí, Minas Gerais, Brasil ..... 64

## LISTAS DE FIGURAS

### Capítulo 1

- Figura 1. Área experimental antes da mineração (julho de 2016) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. .... 6
- Figura 2. Área experimental: Mina de bauxita antes da mineração (22.11.2016) (a); início da extração de minério de bauxita (25.01.2017) (b); área da mina pós-mineração (23.08.2017) (c); área da mina após a reconformação topográfica e suavização do terreno (27.09.2017) (d); área da mina com vegetação (23.03.2018) (e); e, cobertura da vegetação em maio de 2018 (f). .... 8
- Figura 3. Semeadura das espécies de cobertura em linhas (a); linhas das plantas de cobertura (b) perpendiculares à inclinação da encosta (26.01.2018). .... 9
- Figura 4. Croqui do design experimental com a distribuição das parcelas na área antes da mineração (janeiro a maio de 2017) e na reabilitação inicial (janeiro a maio de 2018). .... 10
- Figura 5. Estrutura das parcelas de coleta do escoamento superficial no sentido transversal (a) e sentido longitudinal (b). .... 11
- Figura 6. Parcelas antes da mineração em janeiro de 2017 (a); em reabilitação inicial em janeiro de 2018 (b); em março de 2018 (c); e, em maio de 2018 (d). .... 12
- Figura 7. Ensaio de infiltração em 15 de maio de 2018: o infiltrômetro de anéis concêntricos (a) e os materiais utilizados (b). .... 16
- Figura 8. Medição da resistência mecânica do solo à penetração amostragem antes da mineração em 23 de março de 2017 (a) e amostragem na reabilitação inicial em 16 de março de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. .... 18
- Figura 9. Escoamento superficial (ES) e precipitação (P) antes da mineração de janeiro a maio de 2017 (a) e, durante a reabilitação inicial de janeiro a maio de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. .... 20
- Figura 10. Escoamento superficial (ES) e precipitação (P) antes da mineração e escoamento superficial estimado na reabilitação inicial (a) e, Coeficiente de escoamento (%) antes da mineração e durante a reabilitação inicial (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. .... 22
- Figura 11. Precipitação mensal antes da mineração e durante a reabilitação inicial: precipitação mensal em mm (a); intensidade de precipitação média mensal em  $\text{mm h}^{-1}$  (b);

intensidade máxima mensal de precipitação em $\text{mm h}^{-1}$ (c); e duração das precipitações em horas (d). (Barras de erro são $\pm$ desvio padrão). .....	23
Figura 12. Diagrama de perfil (a) e projeções das copas da vegetação (b) antes da mineração (maio de 2017) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. ....	25
Figura 13. Diagrama de perfil (a) e projeções das copas da vegetação (b) na reabilitação inicial (maio de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. ....	26
Figura 14. Visão da estrutura vertical da vegetação antes da mineração em maio de 2017 (a) e na reabilitação inicial em maio de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.....	26
Figura 15. Camada de serapilheira antes da mineração (maio de 2017) (a) em um gabarito de $25\text{cm}^2$ ; e ausência da camada de serapilheira na reabilitação inicial (b) (maio de 2018) em um gabarito de $25\text{cm}^2$ , no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. ....	27
Figura 16. Rugosidade no sentido do declive antes da mineração representada pela linha branca tracejada (a); em nível após mineração e reconformação da superfície na reabilitação inicial representada pela linha preta tracejada (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais. ....	29
Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração das seis amostragens antes da mineração (março de 2017) (a) e na reabilitação inicial (março de 2018) (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.....	34
Figura 18. Resistência à penetração do solo antes da mineração e do substrato na reabilitação inicial para cada profundidade. Barra de uma mesma profundidade seguida pela mesma letra indica que os tratamentos não diferem pela análise de variância (p-valor < 0,05). ....	35
Figura 19. Resistência do solo à penetração entre as profundidades ao longo do perfil de 60 cm, antes da mineração (a); e na reabilitação inicial (b). As letras referem-se aos agrupamentos de resistência entre as profundidades do mesmo tratamento pelo teste de Scott Knott (p-valor <0,05).....	36
Figura 20. Taxa de Infiltração Inicial (TII) (a); Taxa de infiltração estável (TIE) (b); e Capacidade de infiltração (CI) (c) antes da mineração (maio de 2017) e na reabilitação inicial (maio de 2018), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil. ...	38
Figure 21. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na área de referência antes da mineração no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.....	40

Figure 22. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial da reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.....	41
--	----

## Capítulo 2

Figura 1. Localização da área experimental na área da mina reabilitada no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil (imagem de setembro de 2017). .....	46
Figura 2. Médias mensais da precipitação acumulada mensal e vazões mínimas da série histórica de 60 anos da região da área da mina reabilitada, município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	47
Figura 3. Croqui do design experimental com a distribuição das parcelas na área reabilitada com 2,5 anos e com 3,5 anos após a mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	48
Figura 4. Estrutura das parcelas de coleta do escoamento superficial no sentido transversal (a) e sentido longitudinal (b). ....	49
Figura 5. Precipitação e escoamento superficial mensal (janeiro a dezembro de 2017) no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil: Precipitação em aberto, precipitação interna e escoamento superficial mensal em mm (a); Intensidade de precipitação máxima mensal em mm h <sup>-1</sup> e escoamento superficial em mm (b), Intensidade de precipitação média mensal em mm h <sup>-1</sup> e coeficiente de escoamento (%) (c). ....	56
Figura 6. Precipitação (mm) e escoamento superficial mensal (mm) aos 2,5 anos de reabilitação (outubro de 2016 a maio de 2017) (a); e aos 3,5 anos de reabilitação (outubro de 2017 a maio de 2018) (b), no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	57
Figura 7. Coeficiente de escoamento superficial (%) aos 2,5 anos de reabilitação (outubro de 2016 a maio de 2017) e 3,5 anos de reabilitação (outubro de 2017 a maio de 2018), no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	58
Figura 8. Massa saturada média (Mg ha <sup>-1</sup> ) e massa seca média (Mg ha <sup>-1</sup> ) da serapilheira acumulada (a); e capacidade de retenção hídrica (CRH) da serapilheira (kg kg <sup>-1</sup> ) (b) de <i>Eucalyptus</i> aos 2,5 e 3,5 anos da reabilitação após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. Mesmas letras nas barras do mesmo parâmetro não diferem entre si pela análise de variância (p <0,05). ....	60
Figura 9. Serapilheira no gabarito de 0,25 m <sup>2</sup> aos 2,5 anos de reabilitação (maio de 2017) (a) e aos 3,5 anos de reabilitação (maio de 2018) (b), no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	61

Figura 10. Taxa de Infiltração Inicial (TII) e taxa de infiltração estável (TIE) (a) e; Capacidade de infiltração (CI) (b) aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. Barras de erro representam $\pm$ desvio padrão. Médias com mesma letra não diferem pela análise de variância (p-valor < 0,05) no mesmo parâmetro. ....	61
Figura 11. Resistência mecânica do solo à penetração registados nas seis amostragens aos 2,5 anos de reabilitação em março de 2017 (a) e aos 3,5 anos de reabilitação em março de 2018 (b), no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	66
Figura 12. Resistência à penetração do substrato aos 2,5 anos e 3,5 anos de reabilitação para cada profundidade. Barra com mesma letra indica que os tratamentos não diferem pela análise de variância (p-valor < 0,05). ....	66
Figura 13. Resistência do solo a penetração entre as profundidades ao longo do perfil de 60 cm: a) diferença entre as profundidades aos 2,5 anos de reabilitação; e b) diferença entre as profundidades aos 3,5 anos de reabilitação. As letras referem-se aos agrupamentos de resistência entre as profundidades no mesmo tratamento pelo teste de Scott Knott (p-valor <0,05). ....	67
Figura 14. Coeficientes de correlação de Pearson ( $r^2$ ) entre o escoamento superficial e a precipitação aos 2,5 anos (a) e 3,5 anos de reabilitação (b) após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	68
Figura 15. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na idade de 2,5 anos após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	69
Figura 16. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na idade de 3,5 anos após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. ....	70

## RESUMO

SPLETOZER, Aline Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Avaliação do escoamento superficial em áreas de mineração de bauxita na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil.** Orientador: Herly Carlos Teixeira Dias.

A mineração superficial contribui para o desenvolvimento econômico e social, mas altera as paisagens e os ecossistemas, podendo modificar os processos hidrológicos, como o escoamento superficial. A recuperação dessas áreas busca restabelecer os processos ecológicos e hidrológicos. Portanto, o monitoramento do escoamento superficial em áreas reabilitadas permite demonstrar a eficiência da reabilitação após a mineração. Este trabalho teve o objetivo de avaliar os efeitos da mineração de bauxita no escoamento superficial em minas de bauxita no sudeste de Minas Gerais, Brasil. No capítulo 1, o objetivo foi comparar o escoamento superficial de antes da mineração com o da reabilitação inicial, após mineração. Sete parcelas coletoras de escoamento superficial foram alocadas e monitoradas antes da mineração e durante a reabilitação inicial. Fatores físico-ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial foram caracterizados nos dois períodos e submetidos à análise de componentes principais (ACP). O escoamento superficial diminuiu de 0,76 % (área de referência) para 0,30 % da precipitação na reabilitação inicial. A redução da inclinação do terreno e o aumento da rugosidade da superfície foram os fatores mais explicativos para a redução do escoamento superficial, pois, diminuem a velocidade e o volume das perdas de água. A densidade e o teor de silte do solo aumentaram e a porosidade total, macroporosidade e matéria orgânica diminuíram na reabilitação inicial. A resistência do solo foi igual até a profundidade de 30 cm e aumentou na reabilitação inicial nas demais profundidades. Alterações nas propriedades físicas do solo e a redução de matéria orgânica são explicadas pelo revolvimento e exposição dos horizontes superficiais do solo. As taxas de infiltração foram iguais devido à presença de fissuras e fendas no substrato da reabilitação inicial que se assemelha aos caminhos biológicos de antes da mineração. O capítulo 2 objetivou comparar o escoamento superficial gerado entre 2,5 e 3,5 anos de reabilitação, após mineração de bauxita. Outras sete parcelas foram instaladas em uma área já reabilitada e monitorada em dois períodos chuvosos de anos consecutivos: 2,5 e 3,5 anos de reabilitação. Os fatores físico-ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial foram

caracterizados nos dois períodos e submetidos à ACP. O coeficiente de escoamento superficial médio aos 2,5 anos foi 0,17% ( $\pm 0,37\%$ ) da precipitação e igual (p-valor  $< 0,05$ ) ao da idade de 3,5 anos (0,12%  $\pm 0,26\%$ ) de reabilitação. Esses coeficientes de escoamento foram menores do que o de área de plantio de eucalipto sem mineração (0,56%) na região e na mesma faixa de declividade. O sucesso do estabelecimento da cobertura vegetal, já no primeiro período avaliado, explica os valores semelhantes de escoamento superficial. A área de projeção das copas, diâmetro dos fustes de eucalipto, a serapilheira acumulada e sua capacidade de retenção hídrica aumentaram de 2,5 para 3,5 anos de reabilitação devido ao crescimento e maior porte das árvores, que potencializa elevada produção e deposição de folhas no solo. As taxas e a capacidade de infiltração e os parâmetros físicos do solo foram pouco alterados entre os períodos, pois, as características físicas do solo demandam muitos anos para modificação. As propriedades do solo, topografia construída e característica das plantas após mineração reduziram o escoamento superficial na reabilitação inicial, e permaneceram menores que a área de referências nos anos de reabilitação subsequentes.

## ABSTRACT

SPLETOZER, Aline Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Evaluation of surface runoff in bauxite mining areas in the Zona da Mata of Minas Gerais, Brazil.** Advisor: Herly Carlos Teixeira Dias.

Surface mining contributes to economic and social development, but alters landscapes and ecosystems, and can modify hydrological processes, such as surface runoff. The recovery of these areas seeks to restore ecological and hydrological processes. Therefore, the monitoring of surface runoff in rehabilitated areas allows demonstrating the efficiency of rehabilitation after mining. This work had the objective of evaluating the effects of bauxite mining on surface runoff in bauxite mines in the southeast of Minas Gerais, Brazil. In chapter 1, the objective was to compare the pre-mining surface runoff with that of the initial rehabilitation after mining. Seven surface runoff plots were allocated and monitored prior to mining and during initial rehabilitation. Physical-environmental and anthropogenic factors that interfere with surface runoff were characterized in both periods and submitted to principal component analysis (PCA). The runoff decreased from 0.76% (reference area) to 0.30% of precipitation at initial rehabilitation. The reduction of the slope of the terrain and the increase of the surface roughness were the most explanatory factors for the reduction of the surface runoff, since they reduce the speed and the volume of the water losses. Density and soil silt content increased and total porosity, macroporosity, and organic matter decreased in initial rehabilitation. The soil resistance was equal to the depth of 30 cm and increased in initial rehabilitation in the other depths. Changes in the physical properties of the soil and the reduction of organic matter are explained by the revolving and exposure of the superficial horizons of the soil. The infiltration rates were the same due to the presence of cracks and crevices in the substrate of the initial rehabilitation that resembles the biological pathways prior to mining. Chapter 2 aimed to compare the surface runoff generated between 2.5 and 3.5 years of rehabilitation after bauxite mining. Seven other plots were installed in an area already rehabilitated and monitored in two rainy periods of consecutive years: 2.5 and 3.5 years of rehabilitation. Physical-environmental and anthropogenic factors that interfere with surface runoff were characterized in both periods and submitted to PCA. The average runoff coefficient at 2.5 years was 0.17% ( $\pm 0.37\%$ ) of the precipitation and

the same (p-value <0.05) at the age of 3.5 years ( $0.12\% \pm 0.26\%$ ) of rehabilitation. These runoff coefficient were lower than the eucalyptus plantation area without mining (0.56%) in the region and in the same slope. The success of the establishment of the vegetal cover, already in the first evaluated period, explains the similar values of surface runoff. The crown projection area, diameter of the eucalyptus shafts, accumulated litter and its water retention capacity increased from 2.5 to 3.5 years of rehabilitation due to the growth and greater size of the trees, which potentiated high production and deposition of leaves on the ground. The rates and infiltration capacity and physical parameters of the soil were little changed between the periods, since the physical characteristics of the soil require many years for modification. Soil properties, built topography and characteristics of plants after mining reduced runoff at initial rehabilitation, and remained smaller than the reference area in subsequent years of rehabilitation.

## INTRODUÇÃO GERAL

A contribuição da mineração para o desenvolvimento econômico e social é evidente, pois fornece materiais considerados essenciais (NIGAM et al, 2017). No Brasil, a participação do setor mineral no Produto Interno Bruto (PIB) chegou a quase 4% (BRASIL, 2014). A bauxita, explorada no Brasil, é um minério constituído por óxido de alumínio hidratado, a partir do qual se obtém o alumínio (SAMPAIO et al., 2001). As reservas brasileiras possuem bauxita de ótima qualidade com mais 40% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) aproveitável (ABAL, 2017). O Brasil detém a terceira maior reserva mundial de bauxita, com 3,5 bilhões de toneladas e produz cerca de 37 milhões de toneladas anuais (ABAL, 2017).

A bauxita é proveniente de minas de superfície, também denominadas de minas a céu aberto (RUBIO et al, 2013). O procedimento de exploração usado na mineração a céu aberto inicia-se com a remoção da vegetação e dos horizontes superiores do solo para atingir a matéria-prima. Após a exploração do minério, os materiais de solo e camada de solo orgânico (*topsoil*) retirados na etapa anterior, são usados para preencher as cavas e reconstituir a topografia da área. Em seguida, a área é reabilitada com a composição botânica anterior à exploração ou outra requerida pelo proprietário da área, conforme exigido pela legislação brasileira (CHAER, et al, 2011; VILAS BOAS et al., 2018).

A mineração de superfície altera as paisagens e os recursos hídricos, mas a reabilitação pode minimizar os efeitos negativos dessa atividade (ATANACKOVÍČ et al., 2013). No processo de reabilitação de áreas de mineração a céu aberto, o controle do escoamento superficial de água é um desafio (RUBIO et al, 2013), principalmente no início da reabilitação, pois, os materiais de solo recolocados após a mineração são susceptíveis a erosão (NIGAM et al, 2017).

A reabilitação de áreas mineradas tem a finalidade de minimizar os impactos ambientais, incluindo a redução do escoamento superficial (MARTIN-MORENO et al., 2016). O controle efetivo do escoamento superficial requer o monitoramento e a gestão integrada da topografia, da estrutura do solo e da vegetação (NICOLAU, 2003). O recobrimento da vegetação reduz o volume de escoamento após a mineração (KUO; MUÑOZ-CARPENA, 2009; RUBIO et al, 2013). As propriedades do solo minerado não são estáticas, mas se modificam ao longo do tempo em associação com a comunidade vegetal (CLARK; ZIPPER, 2016). Além disso, a topografia e a

rugosidade da superfície influenciam na colonização das plantas e na velocidade do escoamento superficial da água (MARTIN-MORENO et al., 2016).

O fluxo hidrológico superficial não é estável nos anos após o término das atividades de mineração de superfície (EVANS et al., 2015). Um dos problemas encontrados em estudos hidrológicos é a necessidade de monitorar o escoamento superficial em áreas de mineração a céu aberto, que geralmente têm apenas registros de precipitação e nenhum registro de escoamento superficial em campo (NIGAM et al, 2017).

Pesquisas que consideram parâmetros hidrológicos no processo de reabilitação são importantes para definir metodologias que permitam a busca por uma mineração sustentável e protetora dos recursos hídricos (RUBIO et al, 2013). Retorno a um ecossistema funcional, semelhante ou melhor à pré-perturbação é o objetivo da reabilitação na mineração de superfície (REYNOLDS e REDDY, 2012). O monitoramento do escoamento superficial nessas áreas mineradas é fundamental para avaliar se este objetivo está sendo alcançado e necessário para aprimorar as estratégias de recuperação desses ecossistemas (MANNA e MAITI, 2016; EVANS et al., 2015).

Nesse contexto, o objetivo foi avaliar os efeitos da mineração de bauxita no escoamento superficial comparando o escoamento superficial gerado antes do processo de mineração com o gerado no início da reabilitação e o monitorando o escoamento superficial em 2,5 e 3,5 anos de reabilitação.

## Capítulo 1

### Escoamento superficial na reabilitação inicial após mineração de bauxita

#### Resumo

A mineração de superfície altera os processos hidrológicos e as características do solo, por isso, é motivo de preocupação ambiental, social e técnica. O escoamento superficial é um parâmetro que pode ser utilizado para monitorar a eficiência da reabilitação após a mineração. O objetivo desta pesquisa foi comparar o escoamento superficial gerado durante a reabilitação inicial, após a mineração de bauxita, com o escoamento de referência, antes da mineração. Sete parcelas, em uma área de mina de bauxita no sudeste de Minas Gerais, Brasil, foram alocadas para coleta do escoamento superficial e monitoradas antes da mineração (janeiro a maio de 2017) e durante a reabilitação inicial (janeiro a maio de 2018). Os fatores físico-ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial foram caracterizados nos dois períodos e submetidos à análise de componentes principais (ACP). O escoamento superficial diminuiu de 0,76 para 0,30 % da precipitação na reabilitação inicial em relação à área de referência. A inclinação do terreno e rugosidade da superfície foram os fatores determinantes na ACP. A cobertura de vegetação nas parcelas antes e na reabilitação inicial foi de 100 e 64%, respectivamente. A densidade e o teor de silte do solo aumentaram e a porosidade total, macroporosidade e matéria orgânica diminuíram na reabilitação inicial. A resistência do solo foi igual nos dois períodos até a profundidade de 30 cm e aumentou na reabilitação inicial nas profundidades até 60 cm. As taxas de infiltração foram iguais nos períodos. A maior cobertura de vegetação, antes da mineração, favorece um menor impacto das gotas de chuva no solo. As alterações das propriedades físicas do solo e a redução de matéria orgânica são explicadas pelo revolvimento e exposição dos horizontes superficiais do solo. As taxas de infiltração não foram alteradas devido a presença de fissuras e fendas no substrato da reabilitação inicial que se assemelha aos caminhos biológicos de antes da mineração. A diminuição do escoamento superficial é explicada pela redução da inclinação do terreno e aumento da rugosidade da superfície que restringem a velocidade e o volume das perdas de água. As propriedades físicas do solo, topografia construída e a cobertura das plantas após a mineração reduziram o escoamento superficial na reabilitação inicial, sendo a inclinação e rugosidade da superfície os fatores determinantes.

Palavras-chave: Hidrologia; Minas superficiais; Água superficial.

## Chapter 1

### Surface runoff in initial rehabilitation after bauxite mining

#### Abstract

Surface mining alters hydrological processes and soil characteristics, so it is a cause of environmental, social and technical concern. The runoff is a parameter that can be used to monitor the efficiency of rehabilitation after mining. The objective of this research was to compare the surface runoff generated during the initial rehabilitation, after the bauxite mining, with the reference runoff, before the mining. Seven plots in a bauxite mine area in the southeast of Minas Gerais, Brazil, were allocated to surface runoff collection and monitored prior to mining (January to May 2017) and during initial rehabilitation (January to May 2018). Physical-environmental and anthropogenic factors that interfere with surface runoff were characterized in both periods and submitted to principal component analysis (PCA). The runoff decreased from 0.76 to 0.30% of the precipitation at the initial rehabilitation in relation to the reference area. The slope of the terrain and surface roughness were the determining factors in the PCA. The vegetation cover in the plots before and in the initial rehabilitation was of 100 and 64%, respectively. Density and soil silt content increased and total porosity, macroporosity, and organic matter decreased in initial rehabilitation. Soil strength was equal in both periods to depth of 30 cm and increased in initial rehabilitation at depths up to 60 cm. The infiltration rates were the same in the periods. The greater coverage of vegetation, before mining, favors a smaller impact of raindrops on the soil. Changes in soil physical properties and the reduction of organic matter are explained by the revolving and exposure of the soil surface horizons. The infiltration rates were not altered due to the presence of cracks and crevices in the substrate of the initial rehabilitation that resembles the biological pathways prior to mining. The reduction of the surface runoff is explained by the reduction of the slope of the terrain and increase of the roughness of the surface that restrict the speed and the volume of the losses of water. The soil physical properties, topography built and the cover of the plants after mining reduced the superficial runoff in the initial rehabilitation, being the slope and roughness of the surface the determining factors.

Keywords: Hydrology; Surface mines; Surface water.

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração contribui no desenvolvimento econômico e social, mas as mudanças ambientais geradas por essa atividade são motivos de preocupação (BARROS et al., 2012; NIGAM et al, 2017). Entre essas mudanças está a modificação da paisagem, com a alteração da declividade e das propriedades físicas e químicas do solo e da vegetação (EVANS et al., 2015; ZHANG et al., 2016; VILAS BOAS et al., 2018).

A bauxita é um minério explorado pela mineração de superfície (SAMPAIO et al., 2001) que reorganiza os materiais geológicos dos solos originais e pode ter efeito nos processos hidrológicos (CHAER, et al, 2011), como modificar o balanço entre a infiltração e as perdas de água por escoamento superficial (RUBIO et al, 2013). O escoamento superficial gerado nas áreas reabilitadas, após a mineração, pode ser utilizado como parâmetro para avaliar a eficiência do processo de reabilitação dessas minas (RUBIO et al, 2013).

Estudos hidrológicos em áreas reabilitadas após a mineração de superfície mencionam a ausência de registros de escoamento superficial em campo (CARROLL et al., 2000; NIGAM et al, 2017). Pesquisas sobre escoamento superficial são trabalhosas, demoradas e dispendiosas, principalmente sobre condições naturais (CARROLL et al., 2000). Métodos empíricos de modelagem são usados (NIGAM et al, 2017), no entanto, dados de campo são necessários para melhor precisão das estimativas de perdas de água por escoamento superficial após a mineração (CARROLL et al., 2000).

A redução da declividade (BARROS et al., 2012), o aumento da rugosidade da superfície e o estabelecimento da vegetação, após a mineração podem reduzir o escoamento superficial (NIGAM et al, 2017). Pois, a reabilitação pode permitir que os processos hidrológicos funcionem adequadamente após mineração (REYNOLDS e REDDY, 2012). Por isso, os efeitos da mineração no escoamento superficial de água devem ser avaliados juntamente com a caracterização das propriedades do solo (SHEORAN et al., 2010) e do seu manejo, da inclinação e da cobertura vegetal que influenciam nas perdas de água superficial em áreas reabilitadas (ZHANG et al., 2016).

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da reabilitação inicial sobre o escoamento superficial, comparando-o com o escoamento de referência de antes da mineração. Além disso, caracterizar os fatores físico-ambientais e antrópicos, que interferem no escoamento superficial.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em mina de bauxita ( $21^{\circ}0'36''$  S e  $42^{\circ}33'56''$  W) no município de Rosário da Limeira, região sudeste de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

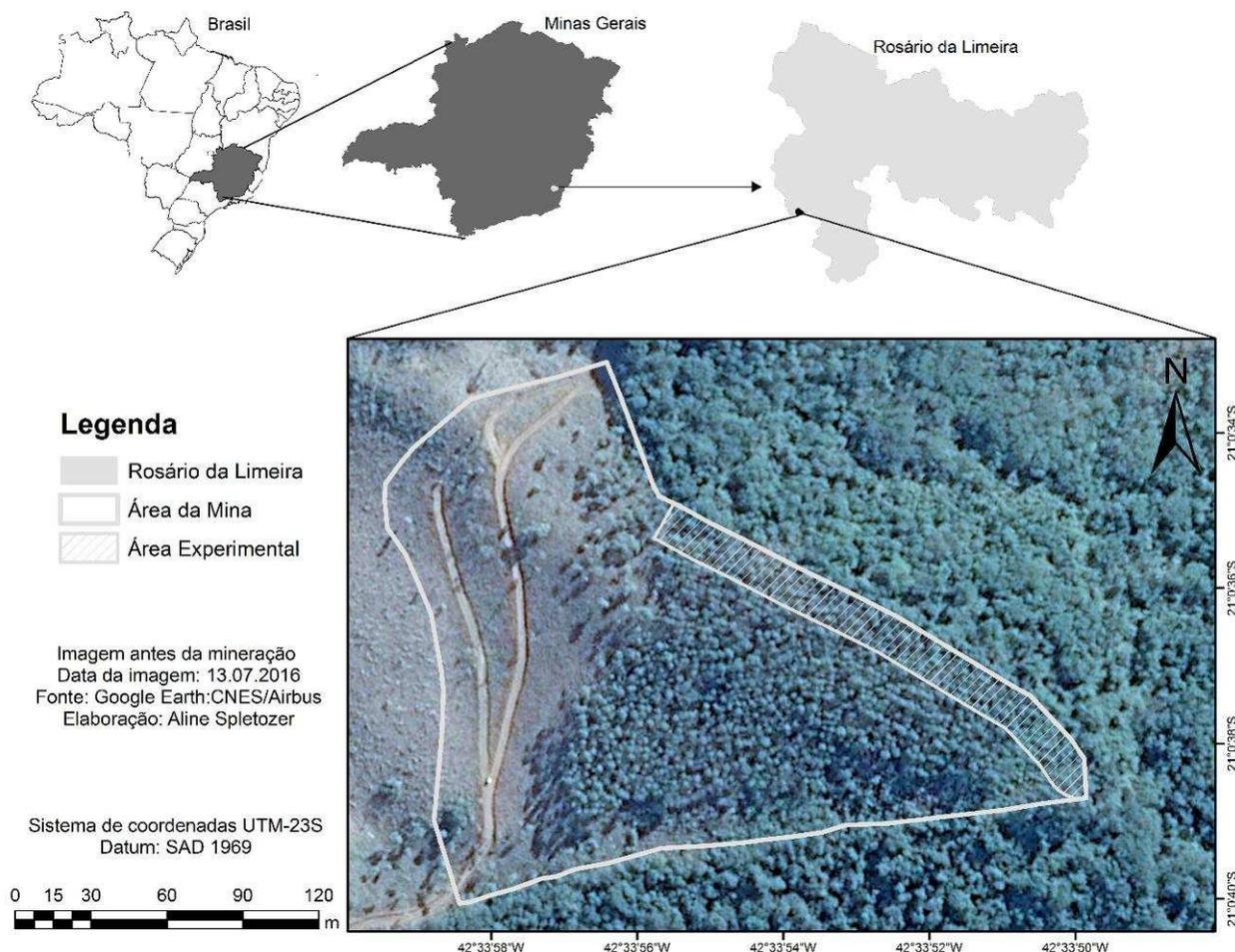


Figura 1. Área experimental antes da mineração (julho de 2016) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

O clima da região é Cwb na classificação de Köppen com duas estações bem definidas: verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média anual é de 1.336 mm e temperatura média anual de 19 °C (ALVAREZ et al., 2013). O tipo de vegetação é Estacional Semidecidual, fisionomia florestal e estratificada da Mata Atlântica que perde de 20 a 50% das folhas do dossel no período seco (ARRUDA et al., 2018). Os solos predominantes são Latossolos Vermelho-Amarelo distrófico típico (BORGES, 2013). O relevo é acidentado com faixas de morros e topos de bauxita que integra um cinturão aluminoso na região, fazendo parte da faixa de rochas granulíticas denominadas de Complexo Juiz de Fora (LOPES e CARVALHO, 1990).

A propriedade rural da área de mina de bauxita foi arrendada pela empresa mineradora no ano de 2016. A área antes da mineração continha um plantio seminal de eucalipto, de oito anos de idade, presença de samambaias acima de 1,30 metros de altura e 10 centímetros de serapilheira, sob um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico com volume estimado de 68.140 m<sup>3</sup> e espessura média de 3,8 m de minério de bauxita. Os tratos silviculturais do plantio feitos pelo produtor consistiram em preparo convencional do solo, denominado “plantio morro a baixo” e 150 gramas de NPK (20-05-20) por cova no plantio, sem adubação de cobertura, controle de formigas e plantas daninhas e replantio de falhas (Figura 2a).

A extração de minério de bauxita da mina teve início em janeiro de 2017 (Figura 2b), precedida pelo decapeamento e construção do sistema de drenagem. O decapeamento consistiu na retirada da vegetação, do *topsoil* (camada superficial de solo orgânico ou “solo rico”) e da camada de solo estéril (solo sem minério abaixo do *topsoil*), os dois últimos foram armazenados em leiras para utilização posterior. O sistema de drenagem incluiu valas de direcionamento da água superficial e poços de decantação. A extração da bauxita da mina foi finalizada em julho do mesmo ano (Figura 2c).

A reconformação topográfica com a reposição da camada de solo estéril e a suavização do terreno com a *topsoil* ocorreu em setembro de 2017, início do processo de reabilitação. A subsolagem cruzada do substrato (solo revolvido sem horizontes pedogenéticos definidos) foi realizada logo após a reconformação topográfica e ordenada perpendicularmente à inclinação da encosta em curvas de nível e com *ripper* triplo de 1 m de profundidade (Figura 2d).

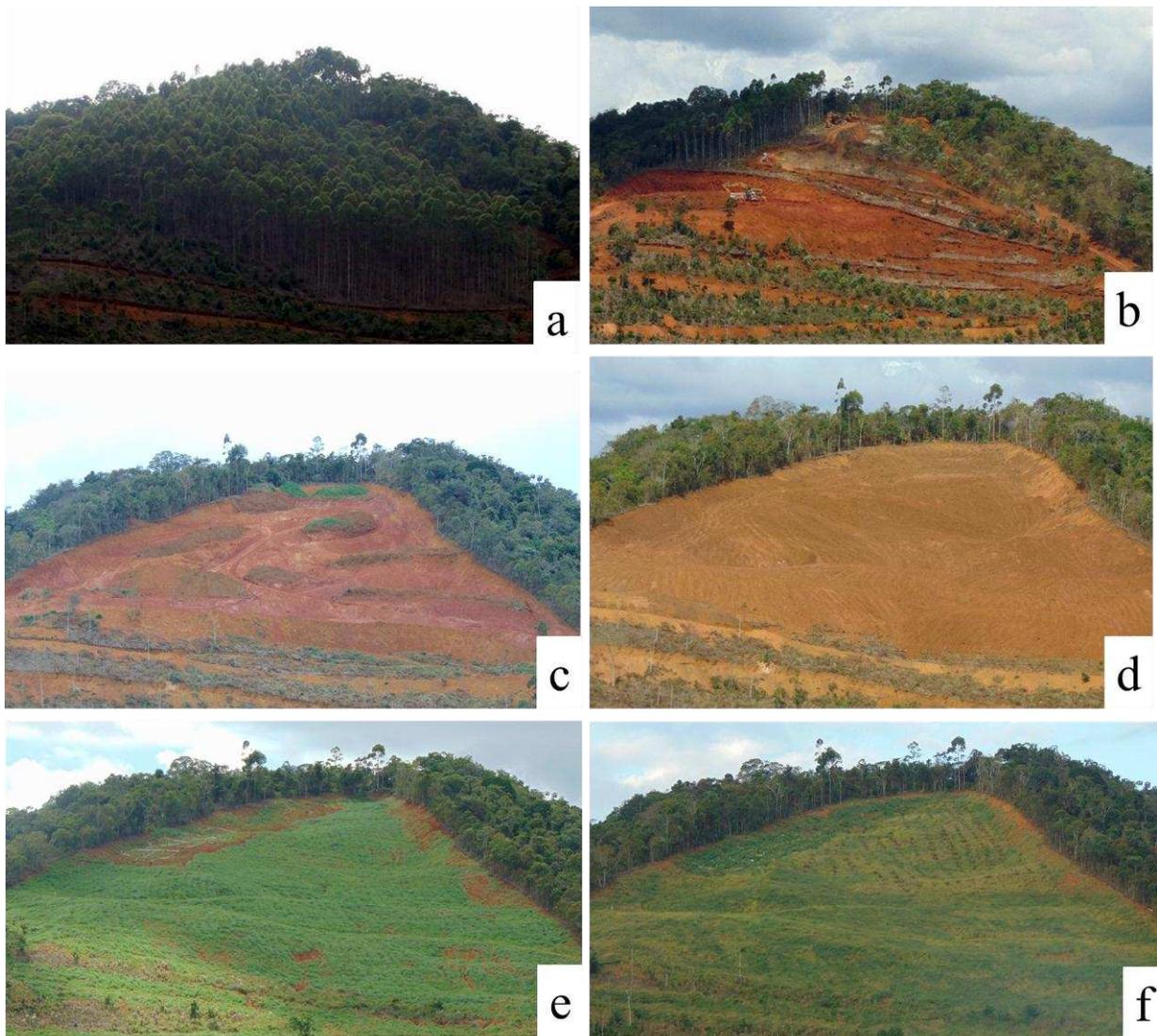


Figura 2. Área experimental: Mina de bauxita antes da mineração (22.11.2016) (a); início da extração de minério de bauxita (25.01.2017) (b); área da mina pós-mineração (23.08.2017) (c); área da mina após a reconformação topográfica e suavização do terreno (27.09.2017) (d); área da mina com vegetação (23.03.2018) (e); e, cobertura da vegetação em maio de 2018 (f).

A calagem e a fosfatagem foram realizadas em dezembro de 2017 nas proporções de  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico e  $2.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de fosfato natural reativo, respectivamente, para a revegetação da área minerada. Em janeiro de 2018, sementes das plantas de cobertura: *Raphanus sativus* L. (nabo forrageiro), *Crotalaria juncea* L. (crotalária), *Cajanus cajan* (L.) Huth (feijão-guandu) e *Brachiaria* sp. foram semeadas em linhas perpendiculares à inclinação da encosta (Figura 3). O plantio inicial de espécies de cobertura objetiva o rápido recobrimento e a estabilização do solo, onde posteriormente será plantando o povoamento de eucalipto de acordo

com a negociação da empresa com o proprietário da área. O termo “reabilitação inicial”, usado para a área pós-mineração neste trabalho, refere-se aos primeiros cinco meses (janeiro a maio) após plantios das espécies de cobertura (Figura 2e).



Figura 3. Semeadura das espécies de cobertura em linhas (a); linhas das plantas de cobertura (b) perpendiculares à inclinação da encosta (26.01.2018).

## 2.2. Escoamento superficial

Sete parcelas coletoras de escoamento superficial foram instaladas antes da mineração (área de referência) e na reabilitação inicial, ambas monitoradas sob chuva natural e alocadas no mesmo local para fins de comparação. As parcelas de referência foram monitoradas de janeiro a maio de 2017 e as de reabilitação inicial de janeiro a maio de 2018 (Figura 4).

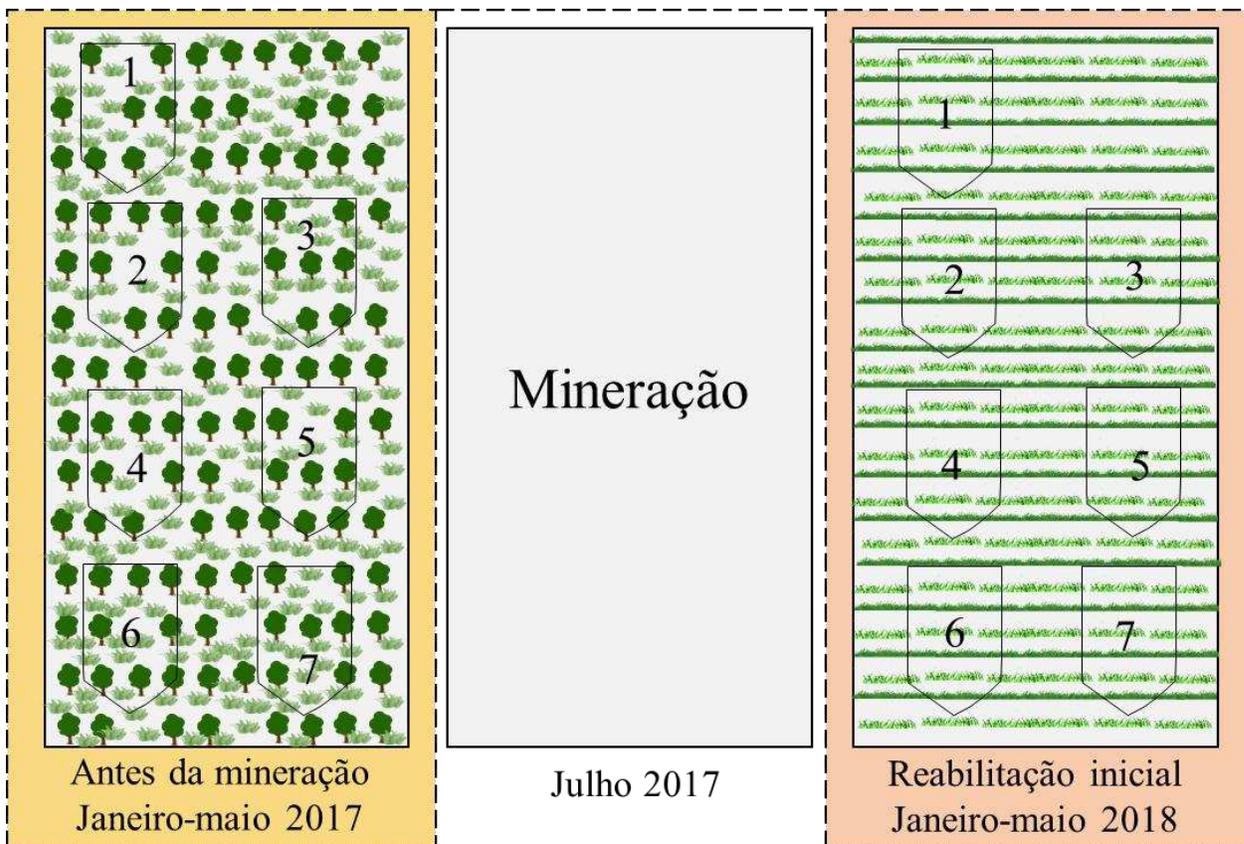


Figura 4. Croqui do design experimental com a distribuição das parcelas na área antes da mineração (janeiro a maio de 2017) e na reabilitação inicial (janeiro a maio de 2018).

O escoamento superficial foi medido em 14 parcelas (7 antes da mineração e 7 na reabilitação inicial) com dimensões de 10 x 6 m mais um afunilamento triangular de 1 m de altura a partir de sua base para direcionamento da água. As parcelas foram delimitadas por chapas de policloreto de polivinila (PVC) e o afunilamento triangular foi construído de alvenaria no extremo de menor altitude (sentido do escoamento). No final do afunilamento foi instalado um cano para conduzir a água para um recipiente com capacidade de 100 litros (bombona) (Figura 5).

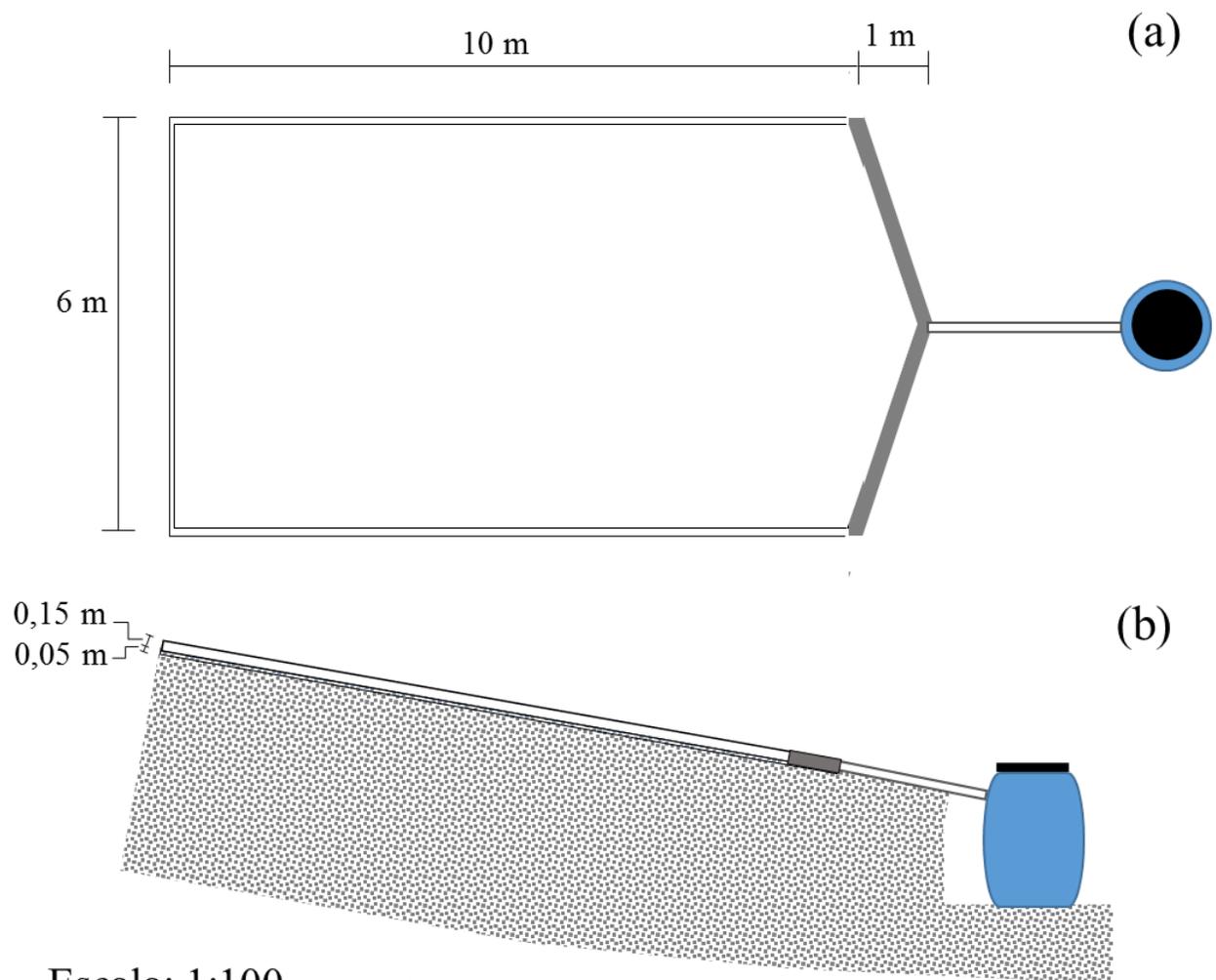


Figura 5. Estrutura das parcelas de coleta do escoamento superficial no sentido transversal (a) e sentido longitudinal (b).

As parcelas antes da mineração foram demarcadas com uma trena de 50 m pelo método de triangulação. Na reabilitação inicial as parcelas foram balizadas pela equipe de topografia da empresa no mesmo local de antes da mineração considerando a alteração topográfica. Três parcelas desse tratamento foram realocadas dentro da área experimental devido as mudanças no sentido do escoamento e plotadas em condições semelhantes às demais (Figura 6).

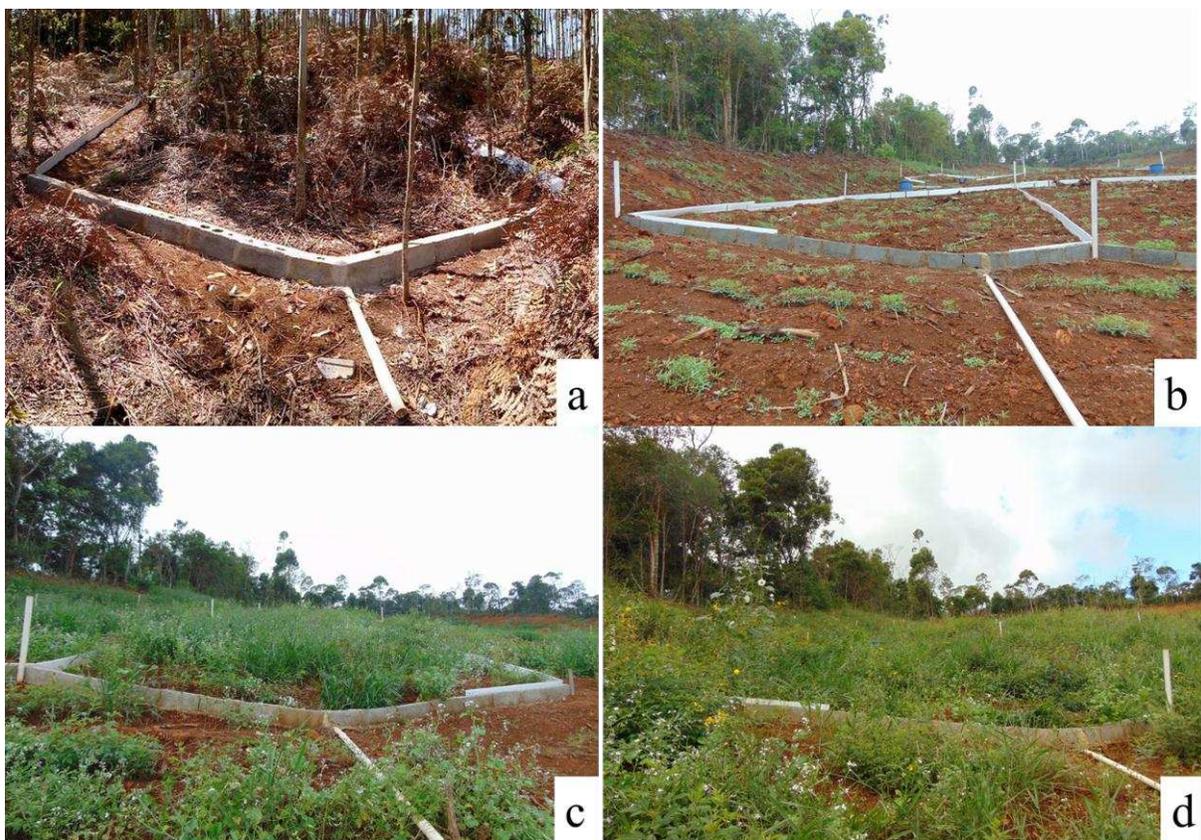


Figura 6. Parcelas antes da mineração em janeiro de 2017 (a); em reabilitação inicial em janeiro de 2018 (b); em março de 2018 (c); e, em maio de 2018 (d).

As parcelas apresentavam áreas de 59,73 a 63,27 m<sup>2</sup> e 67,81 a 63,60 m<sup>2</sup> antes da mineração e durante a reabilitação inicial, respectivamente. A inclinação média das parcelas foi de 13,11° ± 1,91° antes da mineração e 9,46° ± 2,50° durante a reabilitação inicial (Tabela 1).

Tabela 1. Área e inclinação das parcelas coletoras de escoamento superficial antes da mineração e na reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil

Parcelas	Antes da mineração		Reabilitação inicial	
	Área (m <sup>2</sup> )	Inclinação (°)	Área (m <sup>2</sup> )	Inclinação (°)
1	61,96	11,80	66,52	10,1
2	60,92	13,50	66,52	6,5
3	62,04	12,70	63,92	6,5
4	59,73	12,90	67,77	10,5
5	63,27	14,00	63,60	8,5
6	60,65	11,80	67,77	10,6
7	61,37	15,10	65,37	13,5.

O volume de água escoado foi mensurado após as chuvas, sendo cada coleta constituída de uma ou mais chuvas de acordo com as idas semanais ao campo. O volume do escoamento superficial foi mensurado com um balde transparente graduado de 10 litros, e uma proveta plástica transparente de 1 litro graduada a cada 10 mililitros.

O escoamento superficial por parcela foi calculado considerando sua área de contribuição (Tabela 1) no volume escoado usando a equação:  $ES = V/A$ , em que: ES é o escoamento superficial em mm, o V é o volume de água do escoamento coletado em litros e A é a área da parcela em m<sup>2</sup>.

O coeficiente de escoamento superficial por coleta foi calculado pela equação:  $CE = ES/P$ , em que: CE é o coeficiente de escoamento, ES é o escoamento superficial medido em mm, e P é a precipitação que gerou o escoamento em mm. O CE foi multiplicado por 100 para obter o valor em porcentagem.

As médias do ES entre as parcelas por coleta foram calculadas e somadas mensalmente para a análise gráfica mensal. Os CE do escoamento (mm) mensal pela precipitação mensal (mm) foram analisados quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e depois submetidos à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar a diferença entre a reabilitação inicial e a referência antes da mineração.

## **2.3. Fatores que interferem no escoamento superficial**

### **2.3.1. Características da precipitação**

A quantidade e intensidade da precipitação e a duração dos eventos de chuva de janeiro a maio de 2017 (antes da mineração) e de 2018 (durante a reabilitação inicial) foram medidas por um pluviógrafo modelo RainLog 2.0 da RainWise<sup>®</sup>Inc instalado à 300 m da área experimental. Os dados foram descarregados em planilha Excel após os eventos de chuva de grandes intensidades ou quinzenalmente para períodos de baixa intensidade.

A quantidade da precipitação também foi mensurada usando um pluviômetro com 176,71 cm<sup>2</sup> de captação, instalado cerca de 50 m das parcelas, a céu aberto. O volume de chuva coletado no pluviômetro foi medido com uma proveta graduada (mililitros) após as precipitações, constituindo cada coleta de uma ou mais chuvas. O volume observado foi transformado em altura de lâmina de água pela equação:  $P = V/A$ , sendo: P a precipitação em mm, V o volume coletado em litros (L) e A é a área de captação do pluviômetro em m<sup>2</sup>.

Os dados exportados do pluviógrafo para a planilha do Excel foram usados para a análise gráfica da precipitação. A precipitação obtida diariamente em mm foi somada para obter o total mensal. A intensidade de precipitação obtida por evento de chuva em mm h<sup>-1</sup> foi usada para calcular a intensidade média e máxima mensal e desvio padrão. A duração dos eventos de chuva foi obtida dos dados temporais registrados pelo pluviógrafo em minutos e transformados em horas para calcular a duração média mensal das chuvas.

### **2.3.2. Cobertura vegetal**

Um diagrama de perfil da estrutura real da vegetação a partir da largura (6 m) e comprimento (10 m) de uma parcela previamente sorteada por tratamento foi elaborado para caracterizar a cobertura da vegetação antes da mineração e na reabilitação inicial. A altura, o diâmetro do caule e da copa dos indivíduos presentes na parcela foram mensurados e a identificação do indivíduo e da sua posição ao longo do perfil e registro fotográfico foram realizados para elaborar o diagrama de perfil da estrutura real da vegetação (DURIGAN, 2003).

O raio de projeção das copas de *Eucalyptus* sp. foram mensurados com uma trena para caracterizar a área de cobertura do dossel em três parcelas previamente sorteadas antes da mineração. O raio de projeção da copa foi usado para calcular a área de projeção da copa (A) pela equação:  $A = (\pi/4) * rc^2$ , em que:  $rc$  é o raio da copa (m) e  $\pi$  (Pi) uma constante.

A largura das linhas de plantas de cobertura foi mensurada com fita métrica em quatro pontos por linha, de três parcelas sorteadas, para calcular a porcentagem de cobertura de vegetação na reabilitação inicial.

O percentual de cobertura vegetal por área da parcela foi calculado de acordo com a área ocupada pela vegetação, considerando a área de copa das plantas e a largura das faixas das plantas de cobertura constatadas no diagrama da vegetação.

A espessura da serapilheira foi mensurada antes da mineração com uma régua graduada. Essa análise não foi realizada na reabilitação inicial devido à ausência de serapilheira.

### **2.3.3. Rugosidade da superfície do solo**

Microrrelevo ou rugosidade da superfície do solo são as diferenças na altura da superfície do solo em pequena escala. Essa rugosidade quando perpendicular a inclinação do terreno é

responsável pelo armazenamento temporário da água da chuva que infiltra no solo ao invés de se tornar escoamento superficial (ZOBECK e POPHAM, 1997).

A rugosidade linear da superfície (R) foi determinada na reabilitação inicial adotando duas medidas: o comprimento horizontal da parcela (reto) e o comprimento ao longo do relevo superficial (rugoso). O microrelevo de superfície foi medido colocando uma fita métrica ao longo e sobre as ondulações (LOCH, 2000). A razão do comprimento da rugosidade pelo comprimento reto da superfície de três repetições por parcela foi usada para calcular uma expressão numérica da rugosidade superficial:  $R = [(rogosa/reta)]100$ . Essa análise não foi realizada antes da mineração devido à ausência de rugosidades perpendicular ao sentido do escoamento superficial ou do declive.

#### **2.3.4. Atributos do solo**

As amostragens e análises físicas e químicas do solo foram realizadas em março de 2017 e março de 2018, antes da mineração e na reabilitação inicial, respectivamente.

##### **2.3.4.1. Física do solo**

A textura, a densidade, a porosidade total, a macro e microporosidade e a densidade de partícula do solo antes da mineração e do substrato na reabilitação inicial foram analisadas (EMBRAPA, 2017). Essas análises foram realizadas no laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Quatro amostras deformadas na profundidade de 0-10 cm e distantes 1,5 m da lateral de parcelas sorteadas foram coletadas com trado tipo “holandês” para avaliar textura e a densidade de partícula do solo antes da mineração e do substrato na reabilitação inicial. Os tamanhos granulométricos de areia grossa (2,0 - 0,2 mm), areia fina (0,2 - 0,02mm), silte (0,02-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) foram consideradas para textura. As demais análises foram medidas em quatro amostras indeformadas coletadas em anel volumétrico com trado de “Uhland” com os mesmos critérios de amostragem usados nas coletas das amostras deformadas.

As características físicas do solo foram analisadas quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e depois submetidas à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar diferenças entre a reabilitação inicial e a referência antes da mineração.

#### 2.3.4.2. Química do solo

Amostras compostas de 12 pontos, em zig-zag, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, foram coletadas utilizando um trado do tipo “holandês” para caracterizar a fertilidade do solo por análise química de rotina e de matéria orgânica (EMBRAPA, 2017).

#### 2.3.4.3. Infiltração de água no solo

A taxa de infiltração (TI), capacidade de infiltração (CI) e a taxa de infiltração estável (TIE) foram medidas *in situ* pelo método do infiltrômetro de anel duplo usando o infiltrômetro modelo IN2-W da Turf-TecInternational<sup>®</sup> (Figura 7a). O equipamento de anéis concêntricos foi cravado no solo e uma lâmina de água de 10 mm foi adicionada aos anéis para o ensaio. O anel externo foi preenchido primeiro para evitar a infiltração lateral de água do anel interno, que posteriormente foi totalmente preenchido com água para realização do ensaio. Observações do nível da coluna d'água com auxílio de uma régua milimétrica em intervalos de 1, 2, 3 e 5 minutos, escolhidos conforme a altura de água infiltrada, foram realizadas. A cada leitura os anéis eram reabastecidos por água para uma nova observação (Figura 7b). O teste foi conduzido até que a taxa de infiltração fosse constante em pelo menos três medições consecutivas, atingindo a taxa de infiltração estável (TIE).

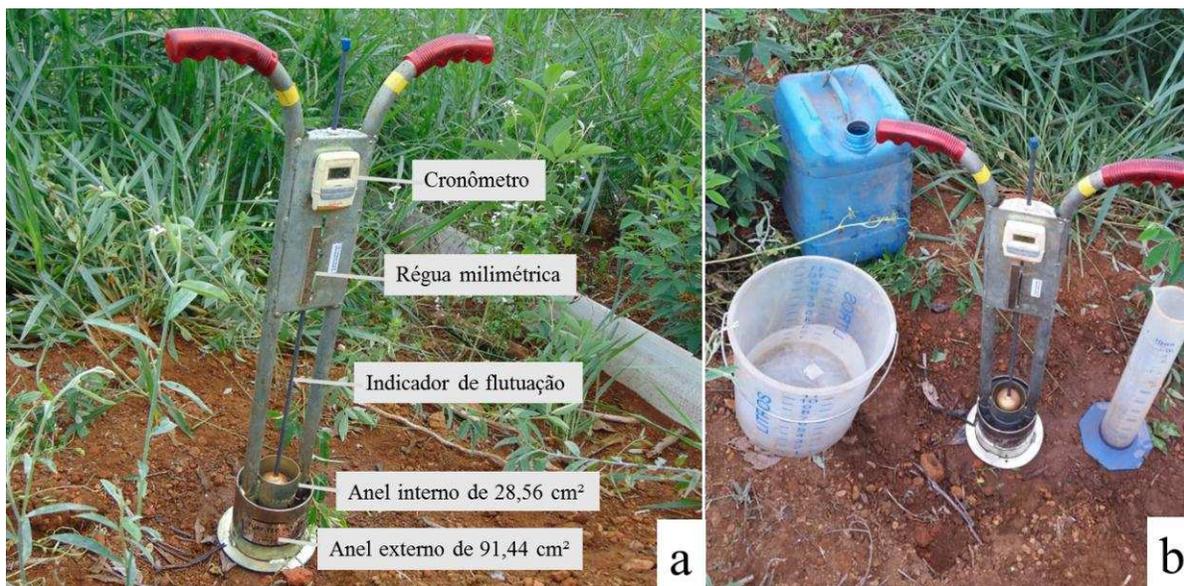


Figura 7. Ensaio de infiltração em 15 de maio de 2018: o infiltrômetro de anéis concêntricos (a) e os materiais utilizados (b).

Três ensaios sorteados entre as parcelas foram realizados por tratamento. Antes da mineração a amostragem foi feita no dia 17 de maio de 2017 e na reabilitação inicial no dia 15 de

maio de 2018. A umidade do solo na profundidade de 0 a 20 cm foi mensurada pelo método gravimétrico nos dias dos testes e avaliada pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) no programa R antes de comparar as taxas de infiltração. O método gravimétrico consiste na coleta da amostra de solo que é colocada em uma lata de alumínio numerada e de massa conhecida para pesagem da massa atual (amostra úmida + recipiente) e transferir para estufa a 105 °C, deixando-a nessa condição até peso constante (para a maioria dos solos, 24 horas é tempo suficiente). Posteriormente, a amostra é retirada da estufa, colocada em dessecador para esfriar e pesada (amostra seca + recipiente). Após as pesagens a umidade pode ser obtida pela equação:  $U = [(Mu - Ms)/Ms]100$ , em que: U é o conteúdo gravimétrico de água, em %, Mu é a massa da amostra úmida, em g, e Ms é a massa da amostra seca a 105 °C até atingir peso constante, em g (EMBRAPA, 2017).

A taxa de infiltração (TI) foi calculada pela relação entre a lâmina infiltrada por intervalo de tempo, usando a equação:  $TI = \Delta h / \Delta t$  em que: TI é a taxa de infiltração em mm h<sup>-1</sup>, h é a altura da lamina de água infiltrada em mm, e t é o intervalo de tempo em horas para infiltrar a lâmina de água. A taxa de infiltração inicial (TII) é aquela mensurada no primeiro instante do ensaio. A capacidade de infiltração (CI) foi considerada a taxa máxima que o solo pode absorver água, sendo considerada a taxa após estabilização da infiltração em um dado intervalo de tempo. O valor da altura de lâmina de água foi transformado em CI (mm h<sup>-1</sup>) pela equação:  $CI = 60 hAc / tAc$ , em que a CI é a capacidade de infiltração, em mm h<sup>-1</sup>, hAc é a altura da lâmina de água infiltrada acumulada (mm), e, tAc é o intervalo de tempo acumulado (min). A taxa de infiltração estável (TIE) foi considerada aquela constante em pelo menos três repetições consecutivas no final do teste.

As médias da TII, CI e TIE foram analisadas quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e depois submetidas à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar as diferenças entre a reabilitação inicial e a referência antes da mineração.

#### **2.3.4.4. Resistência mecânica do solo a penetração**

A resistência mecânica do solo à penetração foi mensurada usando o penetrógrafo automatizado modelo SoloTrack PLG5300 da Falker®. A configuração do aparelho foi: pressão máxima de 6.800 kPa, haste com cone do tipo 2, velocidade de inserção de 2,4 cm s<sup>-1</sup>, profundidade de medição de até 60 cm e resolução de 1 cm (Figura 8).



Figura 8. Medição da resistência mecânica do solo à penetração amostragem antes da mineração em 23 de março de 2017 (a) e amostragem na reabilitação inicial em 16 de março de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

Seis observações antes da mineração e seis na reabilitação inicial foram realizadas, sendo dois acionamentos em três parcelas previamente sorteadas para caracterizar a resistência mecânica do solo à penetração. Três amostras compostas de solo nas profundidades de 0 – 10 cm e de 10 – 20 cm foram coletadas e analisadas quanto ao teor de umidade pelo método gravimétrico para obter a umidade no momento da realização do teste. Os testes foram realizados em 23 de março de 2017 (Figura 8a: antes da mineração) e em 16 de março de 2018 (Figura 8b: reabilitação inicial). A diferença da umidade do solo no momento das amostragens da resistência foi avaliada pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) no programa R antes de comparar a resistência mecânica do solo.

As medições do penetrógrafo foram tabuladas e os valores médios nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm foram analisados quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e então submetidos a análise de variância ( $p \leq 0,05$ ) no programa R para avaliar a diferença entre a reabilitação inicial e a referência antes da mineração. Quando o penetrógrafo parou a medição por atingir a pressão máxima (6.800 kPa), esse valor foi usado para calcular a média. O teste Scott Knott ( $p \leq 0,05$ ) precedido pela análise de variância foi aplicado para agrupar a resistência do solo a penetração das profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm da reabilitação inicial e da referência antes da mineração.

## 2.4. Análises estatísticas

Teste de normalidade de “Shapiro-Wilk” e análise de variância ( $p \leq 0,05$ ) mencionados nas seções anteriores foram realizados para avaliar as diferenças entre a reabilitação inicial e a referência, antes da mineração.

Coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r^2$ ) entre o escoamento superficial e a precipitação (P), intensidade da precipitação (I) e duração da precipitação (D) foram calculados para verificar as influências desses parâmetros no escoamento ( $p \leq 0,05$ ).

Os dados semanais de escoamento superficial e de precipitação da reabilitação inicial foram usados para ajustar um modelo de regressão linear. A precipitação observada antes da mineração foi usada no modelo para estimar o escoamento superficial na reabilitação inicial. A análise de variância ( $p \leq 0,05$ ) foi aplicada para comparar os valores de escoamento superficial estimados na reabilitação inicial e os valores de escoamento observados antes da mineração, ambos para a mesma quantidade de chuva mensal.

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada no conjunto de dados dos fatores que interferem no escoamento superficial para verificar as variáveis inter-correlacionadas e resumir as informações, destacando os fatores de maior influência ou explicativas desses dados.

Os fatores usados na ACP da área de referência (antes da mineração) foram: quantidade de precipitação de chuva (P), intensidade da precipitação (I), duração da precipitação (D), inclinação do terreno (Incl), taxa de infiltração inicial (TII), taxa de infiltração estável (TIE), capacidade de infiltração (CI), resistência mecânica do solo à penetração (RSP), densidade do solo (Ds), densidade das partículas de solo (Dp), porosidade total (PT), macroporosidade (ma) e microporosidade (mi). Os mesmos parâmetros da área de referência mais a área de cobertura de vegetação (ACV) e a rugosidade da superfície (R) foram usados para a ACP da reabilitação inicial. A ACV e R não foram utilizados antes da mineração, por apresentar valor único de 100% e ser ausente, respectivamente.

Os dados foram digitalizados e manipulados no Excel e as análises feitas usando o programa R v.3.5 (R CORE TEAM, 2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Escoamento superficial

O escoamento superficial antes da mineração (janeiro a maio de 2017) foi de 6,31 mm para uma precipitação acumulada de 606,73 mm. No mesmo período de 2018, durante a reabilitação inicial, o escoamento superficial foi de 3,61 mm, com precipitação acumulada no período de 667,25 mm, ou seja, 1,75 vezes menor que na situação anterior a mineração (Tabela 2).

A área de referência apresentou escoamento mínimo em janeiro (0,35 mm), equivalente a 0,91% da precipitação, que foi de 38,85 mm. O escoamento máximo ocorreu em maio (1,77 mm), correspondendo a 2,31 % do total precipitado nesse mês (76,68 mm). A quantidade de escoamento variou entre as parcelas da reabilitação inicial, com os maiores valores observados nas parcelas de maior declividade (Figura 9a). O maior escoamento observado na reabilitação inicial foi de 2,47 mm, correspondendo a 0,79% do total das chuvas do mês de março (312,47 mm), mês em que ocorreu o evento. O escoamento mínimo (0,01 mm) ocorreu no mês de abril e correspondeu a 0,03% das chuvas (29,56 mm) desse mês (Figura 9b).

Maior escoamento em maio, antes da mineração, e março na reabilitação é devido a maior intensidade da chuva nos respectivos meses (DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016). Sob chuvas intensas, a taxa de precipitação excede a taxa infiltração do solo levando ao aumento do escoamento superficial (DOURTE et al., 2015).

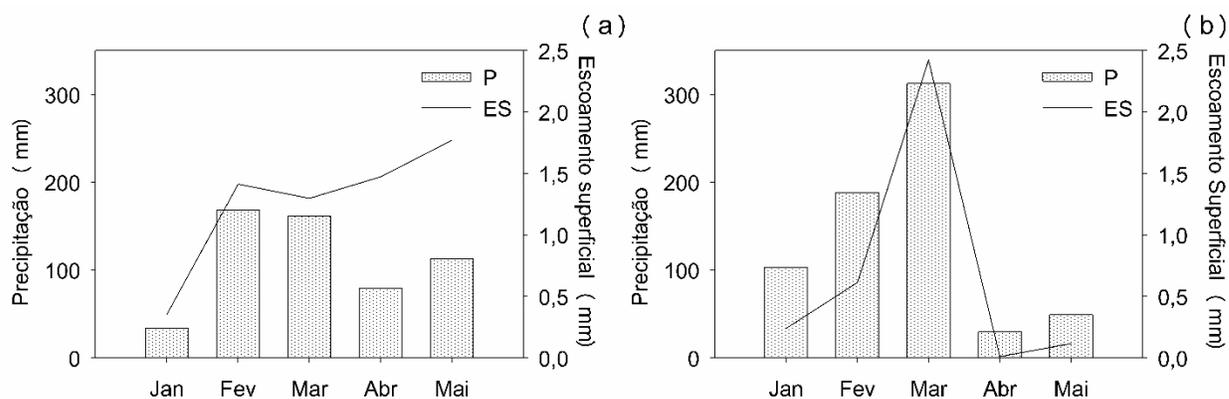


Figura 9. Escoamento superficial (ES) e precipitação (P) antes da mineração de janeiro a maio de 2017 (a) e, durante a reabilitação inicial de janeiro a maio de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

O modelo de regressão linear simples  $Y = -0,058485065 + 0,006987344 X$  em que: Y é o escoamento superficial estimado (mm) e X é a precipitação (mm) com coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 0,75 % foi ajustado usando os valores de escoamento superficial e precipitação medidos na reabilitação inicial para comparar os dois escoamentos usando a mesma quantidade de chuva mensal. A precipitação medida antes da mineração foi usada na equação para estimar o escoamento superficial na reabilitação inicial (Tabela 2). O modelo linear simples foi selecionado, pois, o de segundo grau usando os valores da intensidade da precipitação não apresentou coeficiente significativo. A seleção do modelo linear simples produziu resultados satisfatórios na relação entre a precipitação e o escoamento superficial, que por sua vez, permitiu prever valores coerentes de escoamento superficial (RAJURKAR et al., 2004). O  $R^2$  de 0,75 é considerado substancial para o modelo ajustado (HAIR et al., 2016).

O escoamento superficial estimado pelo modelo para a reabilitação inicial usando a mesma precipitação de antes da mineração (606,73 mm) foi de 3,95 mm e menor que os 6,31 mm da área antes da mineração (Figura 10a; Tabela 2).

Tabela 2. Precipitação, escoamento superficial e coeficiente de escoamento observados antes da mineração e na reabilitação inicial e modelo ajustado na reabilitação inicial usando a precipitação de antes da mineração com o escoamento superficial estimado

							Y= -0,058485065 + 0,006987344 X $R^2 = 0,75$ t = 0,001 **		
Mês	Antes da Mineração			Reabilitação			Estimado na Reabilitação		
	P1	ES1	CE1	P2	ES2	CE2	P1	ESest	CEest
Janeiro	38,85	0,35	0,91	103,10	0,24	0,24	38,85	0,21	0,55
Fevereiro	214,10	1,41	0,66	188,16	0,76	0,41	214,10	1,44	0,67
Março	144,77	1,30	0,90	312,47	2,47	0,79	144,77	0,95	0,66
Abril	132,33	1,47	1,11	29,56	0,01	0,03	132,33	0,87	0,65
Mai	76,68	1,77	2,31	33,95	0,12	0,35	76,68	0,48	0,62
Total	606,73	6,31	1,18	667,25	3,61	0,36	606,73	3,95	0,63

P1 – precipitação antes da mineração (mm), ES1 – escoamento superficial de antes da mineração (mm), CE2 – coeficiente de escoamento superficial de antes da mineração (%), P2 – precipitação na reabilitação inicial (mm), ES2 – escoamento superficial na reabilitação inicial (mm), CE2 – coeficiente de escoamento da reabilitação inicial (%), ESestimado – escoamento superficial (mm) estimado usando a precipitação de antes da mineração pelo modelo ajustado na reabilitação inicial e CEest – coeficiente de escoamento superficial (%) usando o escoamento estimado. No modelo Y é o escoamento estimado (mm) e X é a precipitação observada (mm).

O coeficiente de escoamento superficial médio por coleta na reabilitação inicial foi de 0,30% ( $\pm 0,33$ ) da precipitação acumulada, e antes da mineração foi de 0,79% ( $\pm 0,66$ ). O

coeficiente de escoamento mensal médio na reabilitação inicial foi de 0,36% ( $\pm 0,28$ ) da precipitação acumulada mensal, valor menor ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) que o de antes da mineração (1,18%  $\pm 0,65$ ). O coeficiente variou entre os meses nos dois tratamentos e foi maior em março na reabilitação inicial (Figura 10b).

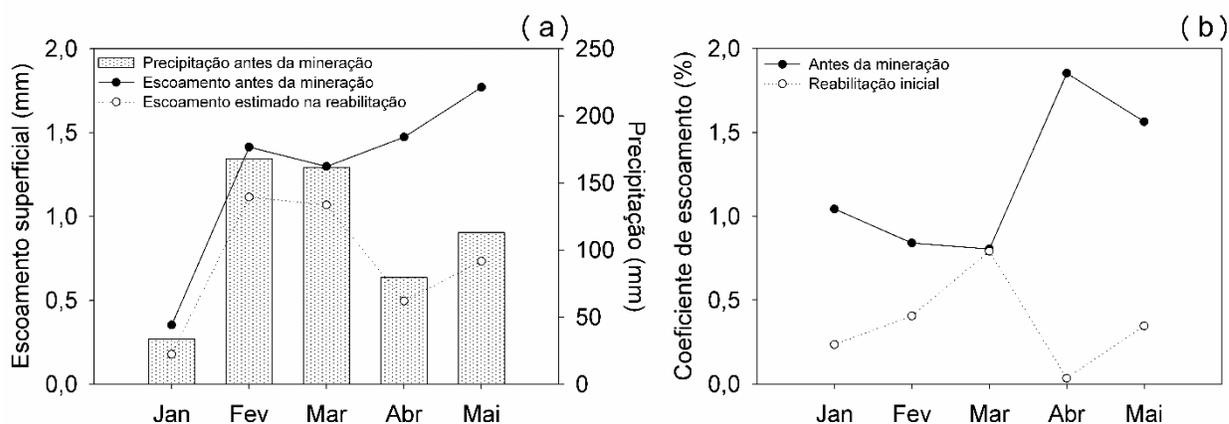


Figura 10. Escoamento superficial (ES) e precipitação (P) antes da mineração e escoamento superficial estimado na reabilitação inicial (a) e, Coeficiente de escoamento (%) antes da mineração e durante a reabilitação inicial (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

Os menores valores de escoamento superficial na reabilitação inicial podem ser explicados pela redução da inclinação (FANG et al., 2015) e aumento da rugosidade da superfície do substrato (BRAMORSKI et al., 2012). A presença de rugosidade perpendicular ao declive retarda o início do escoamento superficial, pelo armazenamento temporário de água nas microdepressões do solo, diminuindo o volume e a velocidade do escoamento e aumentando a infiltração e a retenção de água e sedimentos (BRAMORSKI et al., 2012). O contrário aconteceu antes da mineração com caminhos preferenciais ao escoamento superficial no sistema de eucalipto plantado na direção do declive (PIRES et al, 2006). Os menores valores de escoamento na reabilitação inicial são semelhantes aos encontrados em área reabilitada com plantio de eucalipto, após mineração de bauxita, na mesma região (SILVEIRA, 2017). Da mesma forma, as características do escoamento das chuvas dos solos de minas jovens do Tennessee nos Estados Unidos, que foram recuperadas usando técnicas destinadas a minimizar a compactação do solo para o reflorestamento apresentaram valores menores de escoamento do que o previsto, apesar dos baixos níveis de cobertura vegetal (HOOMEHR et al., 2013). Esses menores valores

demonstram que minas jovens reabilitadas adequadamente podem reduzir o escoamento superficial.

### 3.2. Precipitação

A precipitação antes da mineração e durante a reabilitação inicial foi de 606,73 mm e 667,25 mm, respectivamente. Esses volumes de chuva representaram quase 50% da precipitação média anual (ALVAREZ et al., 2013).

Antes da mineração a precipitação mínima foi de 38,85 mm (janeiro) e máxima de 214,10 mm (fevereiro). Durante a reabilitação inicial as chuvas variaram de 49,05 mm (maio) a 314,19 mm (março). Os meses de maiores chuvas foram 35,28% e 47,08% do total precipitado antes da mineração e durante reabilitação inicial, respectivamente (Figura 11a).

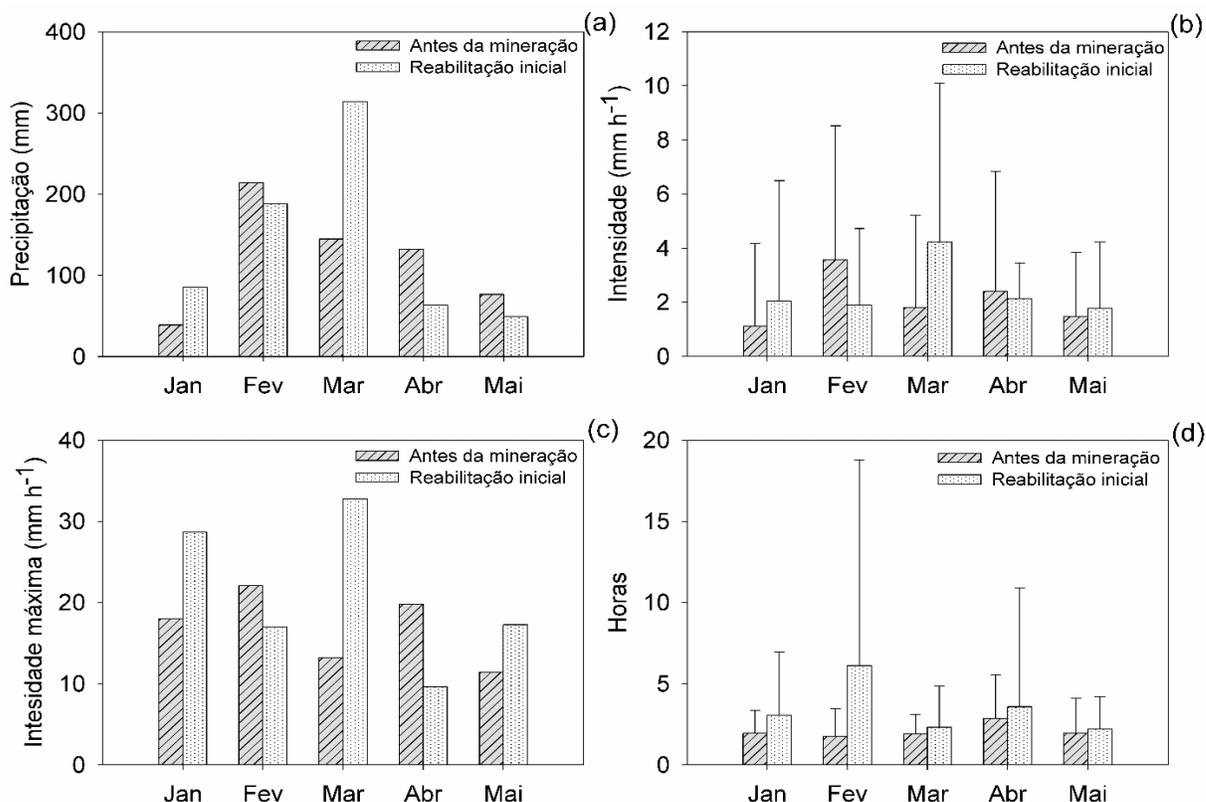


Figura 11. Precipitação mensal antes da mineração e durante a reabilitação inicial: precipitação mensal em mm (a); intensidade de precipitação média mensal em mm h<sup>-1</sup> (b); intensidade máxima mensal de precipitação em mm h<sup>-1</sup> (c); e duração das precipitações em horas (d). (Barras de erro são  $\pm$  desvio padrão).

As diferenças dos totais de precipitação antes da mineração e durante a reabilitação inicial e entre os meses nesses dois períodos são comuns, pois depende de variáveis meteorológicas que

variam entre os meses de um ano, e também, entre os anos que se sucedem (DOURTE et al., 2015). As precipitações de janeiro, março e abril, antes da mineração foram inferiores à normal climatológica da região, correspondendo a redução de 292,54 mm de chuva. Janeiro, abril e maio foram 252,4 mm abaixo da normal climatológica, na reabilitação inicial (INMET, 2018).

A intensidade de precipitação média antes da mineração variou de 1,10 mm h<sup>-1</sup> (janeiro) a 3,56 mm h<sup>-1</sup> (fevereiro) e durante a reabilitação de 1,00 mm h<sup>-1</sup> em abril a 4,23 mm h<sup>-1</sup> em março (Figura 11b). A intensidade máxima foi em fevereiro (22,1 mm h<sup>-1</sup>) e em março (32,77 mm h<sup>-1</sup>), antes da mineração e durante a reabilitação inicial, respectivamente (Figura 11c). Os meses com as menores intensidades de chuva foram aqueles que apresentaram as chuvas de menores durações para os dois períodos. A duração máxima média dos eventos de chuva foi de 2,87 horas (abril) antes da mineração e 12,63 horas (fevereiro) na reabilitação inicial (Figura 11d).

A intensidade da chuva afeta a divisão das precipitações em infiltração e escoamento (DOURTE et al., 2015). A taxa de infiltração pode aumentar com a intensidade e duração da chuva devido ao aumento da condutividade hidráulica do solo quando úmido e ativação dos caminhos preferenciais, como caminhos de minhocas e canais de raízes, pelo aumento do excesso de chuvas que inundam a microtopografia (LANGHANS et al., 2010). Mas sob chuvas intensas a taxa de precipitação excede a taxa infiltração gerando o escoamento superficial (DOURTE et al., 2015). A maior intensidade média e quantidade de chuva na reabilitação inicial poderiam aumentar o escoamento, mas outros fatores foram mais influentes no escoamento superficial. Pois, o escoamento superficial estimado usando a mesma quantidade de chuva da área de referência continuou sendo menor na reabilitação inicial.

### **3.3. Cobertura de vegetação**

Um estrato lenhoso constituído por árvores de eucalipto de até 16 m de altura e o estrato herbáceo, composto por pteridófitas (samambaias) com até 3 m altura, revestindo continuamente o solo sob as copas do estrato lenhoso foi observado no diagrama de perfil da vegetação, antes da mineração (Figura 12a e 13). Dez centímetros de espessura de serapilheira cobrindo o solo (Figura 15a) e falhas no dossel do estrato lenhoso (Figura 13) foram observadas antes da mineração.

O estrato herbáceo, arranjado em linhas, constituído por *Raphanus sativus* L. (nabo forrageiro), *Crotalaria juncea* L. (crotalária), *Cajanus cajan* (L.) Huth (feijão-guandu) e

*Brachiaria* sp. (braquiária) foi observado na reabilitação inicial. Essas plantas revestiram o solo (Figura 14 e 12b), mas a presença de serapilheira não foi observada (Figura 15b).

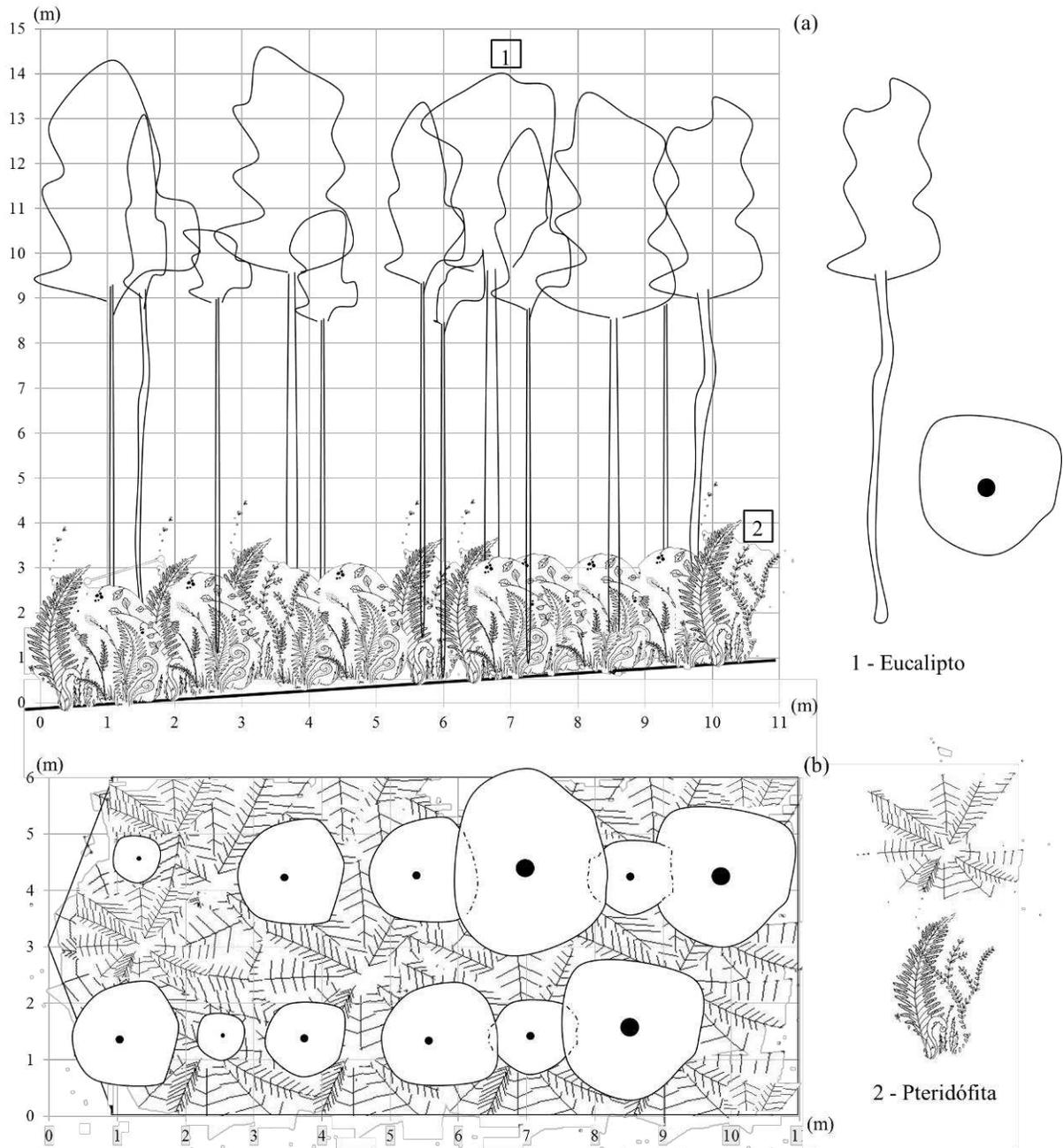


Figura 12. Diagrama de perfil (a) e projeções das copas da vegetação (b) antes da mineração (maio de 2017) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

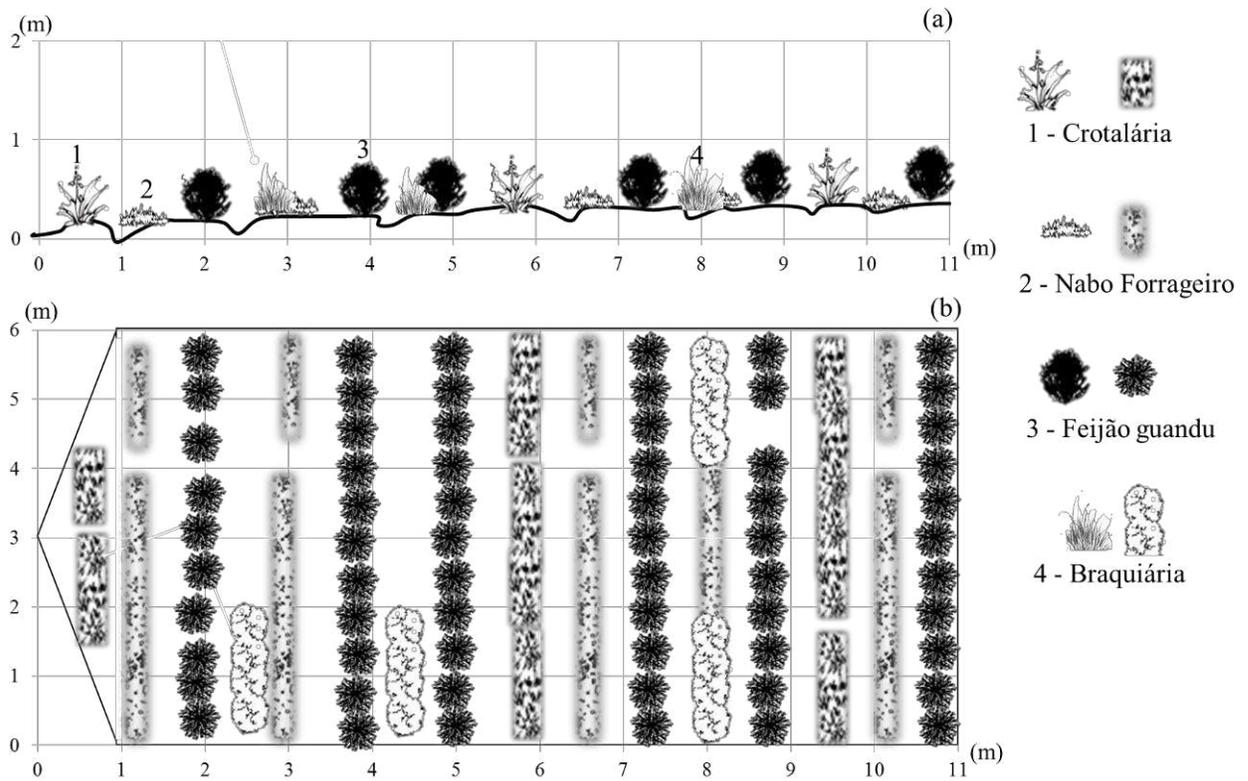


Figura 13. Diagrama de perfil (a) e projeções das copas da vegetação (b) na reabilitação inicial (maio de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

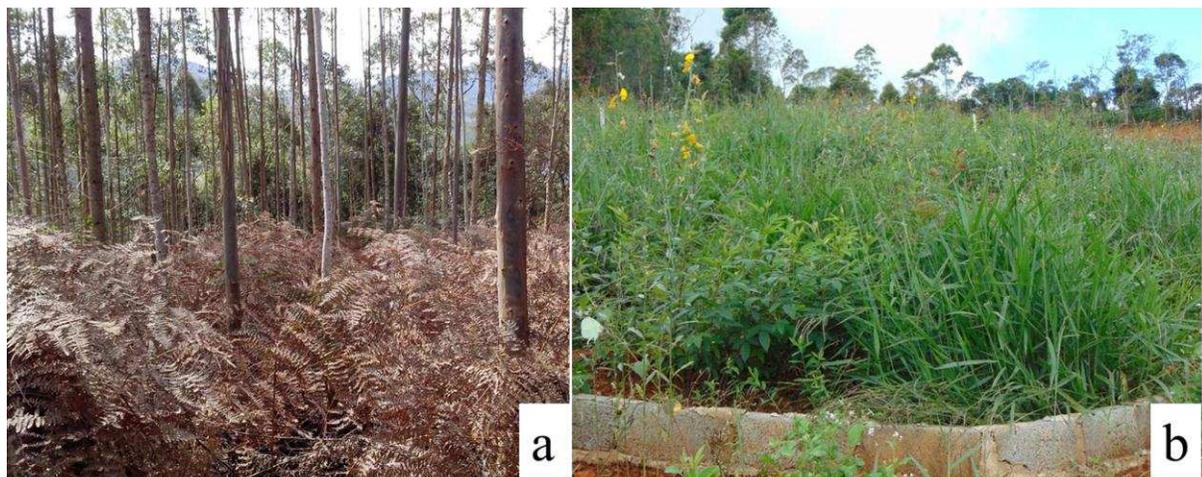


Figura 14. Visão da estrutura vertical da vegetação antes da mineração em maio de 2017 (a) e na reabilitação inicial em maio de 2018 (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.



Figura 15. Camada de serapilheira antes da mineração (maio de 2017) (a) em um gabarito de 25cm<sup>2</sup>; e ausência da camada de serapilheira na reabilitação inicial (b) (maio de 2018) em um gabarito de 25cm<sup>2</sup>, no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

A cobertura vegetal observada nos diagramas da vegetação, com maior estrutura antes da mineração, são indicativos de interceptação das chuvas (LORENZON et al., 2015; ZOU et al., 2015; FREITAS et al., 2016) e da diminuição da energia do impacto das gotas de chuva no solo (ARMENISE et al., 2018), enquanto a cobertura do solo pela serapilheira favorece o aumento nos teores de matéria orgânica, a redução da densidade, o aumento na infiltração de chuva no solo e ainda, minimiza o escoamento superficial de água (LOCH, 2000; VÁSQUEZ-MENDEZ et al., 2010; DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016).

A mistura de plantas de rápido crescimento observada no perfil da vegetação da reabilitação inicial permite uma rápida cobertura, a estabilização da superfície e a produção de matéria orgânica que também pode reduzir o escoamento superficial (LOCH, 2000; AUDET et al., 2013). O intenso crescimento inicial das raízes, seguido por uma rápida senescência, aumenta a porosidade e melhora a estrutura do solo potencializando a infiltração (HUMPHREYS et al., 2013). A cobertura com gramínea e plantas de cobertura para encostas de 70 m de comprimento e 15% de inclinação podem minimizar o descolamento e o transporte de sedimentos por escoamento superficial, mesmo sob chuvas de alta intensidade (LOCH, 2000).

A ausência de serapilheira na reabilitação inicial já era esperada, pois, na mineração de superfície os ciclos biogeoquímicos de nutrientes são quebrados, devido à perda de todos os horizontes e exposição da superfície do solo (LEÓN e OSORIO, 2014). A presença de serapilheira pôde ser observada no segundo ano de reabilitação com plantio de eucalipto, após a mineração de bauxita, na região deste estudo (SILVEIRA, 2017). A queda e decomposição da

serapilheira das plantas de cobertura podem melhorar as propriedades do solo a partir dos 6 anos, após a mineração (LEÓN e OSORIO, 2014).

A porcentagem de cobertura vegetal estimada antes da mineração foi de 100%, sendo 88,90% representada pelo dossel de eucalipto e o restante pelo sub-bosque de pteridófitas. Na reabilitação inicial os valores foram crescentes: 0,0% em janeiro, 41,95% em março e 64,60% em maio de 2018. No início da reabilitação, as parcelas estavam com a superfície do solo nua e, ao longo dos meses, foram sendo colonizadas pelas espécies *R. sativus* L. (nabo forrageiro), *C. juncea* L. (crotalária) e *C. cajan* (L.) Huth (feijão-guandu), chegando a ocupar, 64,60% da superfície do solo no final do mês de maio (Tabela 3).

Tabela 3. Características da vegetação antes da mineração (março de 2017) e na reabilitação inicial (março e maio de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil

Característica	Antes da mineração		Reabilitação inicial	
	Março/2017	Março/2018	Março/2018	Maió/2018
ACV (%)	100,00	41,95	41,95	64,60
CDE (%)	88,90	-	-	-
CDE (m <sup>2</sup> ha)	7.696,37	-	-	-
CS (%)	98,00	41,95	41,95	64,60

ACV – Área de cobertura de vegetação, CDE – Cobertura do dossel de eucalipto, CS – Cobertura do solo por sub-bosque (antes da mineração) ou plantas de cobertura (reabilitação inicial).

Os percentuais de cobertura do dossel e do sub-bosque antes da mineração e plantas de cobertura na reabilitação inicial protegem o solo do impacto das gotas de chuva e consequentemente, reduzem o escoamento superficial (LOCH, 2000; VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010, DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016). Resultados anteriores mostraram que há diferença na erosão do solo e no escoamento superficial entre os diferentes percentuais de cobertura de vegetação (VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010). A relação entre cobertura e escoamento superficial é inversa, indicando uma redução no escoamento para vegetação com mais cobertura, como observado por outros autores em condições similares (LOCH, 2000; SILVEIRA, 2017). A vegetação com maior aérea de cobertura protege melhor o solo contra as forças erosivas da chuva. A cobertura de 60% do solo por vegetação de sub-bosque pode reduzir até 98% do escoamento superficial (VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010). Em geral, uma maior cobertura vegetal e de solo em manchas de vegetação reduz o escoamento de água e a perda de solo (VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010; DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016).

### 3.4. Rugosidade da superfície

Antes da mineração a superfície não apresentou rugosidade em nível, mas caminhos preferenciais no sentido do declive foram observados (Figura 16a). Na reabilitação inicial a rugosidade linear média, em nível, foi de 18,37 % ( $\pm 12,76$ ) (Figura 16b).



Figura 16. Rugosidade no sentido do declive antes da mineração representada pela linha branca tracejada (a); em nível após mineração e reconformação da superfície na reabilitação inicial representada pela linha preta tracejada (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais.

A presença de caminhos preferenciais ao escoamento antes da mineração é explicada pelo preparo do solo realizado a favor do declive, denominado popularmente como “plantio morro-a-baixo” (SILVEIRA, 2017). A rugosidade da superfície do substrato na reabilitação inicial em nível é devido à subsolagem durante seu preparo. A subsolagem realizada na reabilitação da área aumentou a rugosidade da superfície do solo em relação à área de referência, o que pode explicar a redução do escoamento superficial, após a mineração (SILVEIRA, 2017; PANACHUKI et al., 2015). Essas microdepressões permitem o armazenamento temporário de água, retardam o início do escoamento superficial e diminuem seu volume e sua velocidade, além de facilitar a infiltração e a retenção de água e de sedimentos (BRAMORSKI et al., 2012). A rugosidade da superfície do solo tende a diminuir exponencialmente com o aumento do volume de chuva, mas a presença de

cobertura na superfície do solo mantém essa rugosidade (PANACHUKI et al., 2015). As operações de preparo do solo aumentam a rugosidade da superfície, e quando são realizadas a favor do declive, tendem a aumentar o escoamento, enquanto a rugosidade em nível reduz a velocidade e o volume água escoado (PANACHUKI et al., 2015). A rugosidade após extração de minério reduz o escoamento e, essa eficácia pode ser maior nos primeiros dois anos (LOCH, 2000). O recobrimento rápido da cobertura vegetal e maior rugosidade, significa menor escoamento e perda de sedimento na reabilitação inicial (LOCH, 2000; PANACHUKI et al., 2015; VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010).

### 3.5. Atributos do solo

#### 3.5.1. Física do solo

O solo construído na reabilitação apresentou, em média, 19,67 dag kg<sup>-1</sup> de areia grossa, 19,00 dag kg<sup>-1</sup> de areia fina, 13,33 dag kg<sup>-1</sup> de silte e 47,67 dag kg<sup>-1</sup> de argila na camada de 0 a 10 cm. O silte aumentou e a argila reduziu no substrato da reabilitação inicial em relação ao solo de antes da mineração. Essa granulometria permitiu classificar as duas amostras de solo (antes e após mineração) como de textura argilosa (EMBRAPA, 2006). A densidade de partículas e a microporosidade não foi alterada e a densidade do solo aumentou, a porosidade total e macroporosidade diminuíram após a mineração (Tabela 4).

Tabela 4. Propriedades físicas na profundidade de 0-10 cm do solo antes da mineração (março de 2017) e do substrato na reabilitação inicial (março de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil

Propriedade	Unidade	Antes da mineração	Reabilitação inicial
Areia Grossa		19,67 (± 2,01) a	19,67 (±1,42) a
Areia Fina	dag kg <sup>-1</sup>	17,33 (± 2,05) a	19,00 (± 0,88) a
Silte		10,67 (± 0,47) a	13,33 (±0,46) b
Argila		52,33 (± 0,48) a	47,67 (± 0,81) b
Densidade do solo	kg dm <sup>-3</sup>	0,87 (± 0,08) a	1,21 (±0,05) b
Densidade de Partícula		2,40 (± 0,07) a	2,61 (±0,13) a
Macroporosidade	dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup>	0,35 (± 0,01) a	0,23 (± 0,02) b
Microporosidade		0,31 (±0,01) a	0,31 (±0,02) a
Porosidade Total		0,65 (±0,02) a	0,54 (± 0,01) b

Mesmas letras minúsculas na linha não diferem entre si pela análise de variância no mesmo parâmetro (p <0,05).

A redução da argila e conseqüente aumento do silte podem ser atribuídos às práticas de manejo do solo durante a escavação, mistura dos horizontes no armazenamento e na

reconformação topográfica (GANJEGUNTE et al., 2009). Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico apresenta uma pequena variação de textura entre os horizontes (FONTANA et al., 2016) e a mistura desses justifica os resultados de aumento de silte e redução da argila. A alteração das proporções entre argila e silte ocasiona a destruição de agregados no solo e pode aumentar seu potencial de erosão além de reduzir a retenção de água (BARROS et al., 2013).

A densidade de partícula semelhante entre os tratamentos indica que a composição química e mineralógica do substrato não foi alterada (BARROS et al, 2013). Esse resultado é semelhante ao encontrado em solos recuperados de mineração de bauxita comparados a solos naturais em Poços de Caldas, Minas Gerais (BARROS et al, 2013).

O aumento da densidade no solo construído na reabilitação inicial sugere que a cobertura vegetal e serapilheira na condição estrutural original evita a possível compactação ocasionada por chuva ou por pisoteio (MENDES et al, 2006) influenciando no escoamento superficial, tendendo para valores maiores (SANTOS et al., 2018). O aumento na densidade do solo após a mineração de superfície também foi relatado em Ohio nos Estados Unidos (SHRESTHA e LAL, 2011), em Odisha na Índia (AHIRWAL e MAITI, 2016), em Platô de Loess na China (LIU et al., 2017) e também em minas de bauxita (BORGES, 2013; SILVEIRA, 2017). Essa tendência sugere que os materiais de solo superficial requerem melhor manejo durante a remoção, armazenamento e reconformação, de modo a preservar a estrutura do solo (SHRESTHA e LAL, 2011). O uso de maquinário pesado em locais recuperados também pode contribuir com o aumento da densidade do solo após a mineração (GANJEGUNTE et al.,2009).

A redução da macroporosidade e do volume total de poros do substrato na reabilitação inicial diminuem os espaços disponíveis para a aeração do solo e difusão de oxigênio para as plantas podendo até, restringir o seu crescimento (BARROS et al., 2013). A microporosidade, por outro lado, não foi alterada entre os solos, como relatado por Barros et al. (2013) em condições semelhantes. A redução da porosidade pode levar a redução na infiltração da água, pois a taxa de infiltração é correlacionada com o sistema poroso do solo (SANTOS et al., 2018), mas a presença de fissuras e fendas, oriundas do preparo do solo, pode garantir uma boa infiltração (HAIGH e SANSOM, 1999). As principais estratégias na recuperação de solos minerados são: a incorporação de matéria orgânica, a implantação de espécies de cobertura e a subsolagem do solo (BENDFELDT et al., 2001; THOMAS et al., 2015), as duas últimas foram aplicadas na área desse estudo, o que pode ter auxiliado na redução do escoamento superficial.

As mudanças nas propriedades físicas do solo podem ser explicadas pela inversão de seus horizontes no processo de mineração (BARROS et al., 2012). Esses efeitos são inerentes à remodelação topográfica e reestruturação da organização dos perfis de solo (BARROS et al., 2013).

### 3.5.2. Química do solo

Os valores de potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram maiores e a matéria orgânica (MO) foi menor na reabilitação inicial que os de antes da mineração (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros químicos do solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm antes da mineração (março de 2017) e na reabilitação inicial (março de 2018) no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil

Parâmetro	Unidade	Antes da mineração	Reabilitação inicial	Antes da mineração	Reabilitação inicial
Profundidade	cm	0-10		10-20	
pH H <sub>2</sub> O		4,9	6,64	4,88	5,98
P		1,4	19,1	1,3	6,2
K	mg/dm <sup>3</sup>	15	20	13	20
Ca <sup>2+</sup>		0,11	4,98	0,07	2,28
Mg <sup>2+</sup>		0,09	1,14	0,07	0,63
Al <sup>3+</sup>		0,9	0	0,5	0
H + Al	cmolc/dm <sup>3</sup>	13,4	3,8	12,2	6,1
SB		0,24	6,17	0,17	2,96
t		1,14	6,17	0,17	2,96
T		13,64	9,97	12,37	9,06
V	%	1,8	61,9	1,4	32,7
m		78,9	0	74,6	0
MO	dag/kg	7,5	5,65	8,15	5,02
P-Rem	mg/L	10,7	9,95	10,9	8

SB – Soma de Bases, t – Capacidade de troca catiônica efetiva, T – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0, V – Índice de saturação por bases, m – Índice de saturação por alumínio, MO – Matéria Orgânica, P-Rem – Fósforo remanescente.

A redução da matéria orgânica na reabilitação inicial pode ser explicada por ser facilmente perdida pela decomposição durante o armazenamento e exposição do *topsoil* (LIU et al., 2017). A recuperação da matéria orgânica em solos após a recuperação é um processo lento e

geralmente leva décadas para retornar ao nível natural (LIU et al., 2017). Resultados anteriores mostraram que a concentração de carbono orgânico do *topsoil* declina inicialmente após a recuperação e leva cerca de 40 anos para se recuperar (CUI et al., 2012). O estoque de carbono orgânico do solo pode aumentar de 0,11% para 0,69% após 20 anos de recuperação, na profundidade de 0 a 15 cm (JUWARKAR et al., 2010). Resultados de redução da MO após a mineração de superfície em comparação com a dos locais não minerados foram relatadas em Platô de Loess, China (LIU et al., 2017) e em mina de bauxita pós lavra na mesma região deste estudo (SILVEIRA, 2017). O menor teor de MO pode resultar no selamento superficial do solo induzido pelo impacto das gotas de chuva, essa vedação reduz sua capacidade de reservar água podendo aumentar o escoamento superficial (ARMENISE et al., 2018). A implantação de espécies de cobertura na área pode acelerar o aumento de MO, devido ao intenso crescimento inicial das raízes, seguido por uma rápida senescência (HUMPHREYS et al., 2013).

Os maiores valores de P, K, Ca, Mg e do pH na reabilitação inicial podem ser justificados pela adubação e calagem realizadas antes da revegetação, que objetivaram corrigir o pH e aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo. Isso mostra que as atividades de reabilitação podem reparar os teores de nutrientes do solo nas fases iniciais de recuperação (LIU et al., 2017). Já os baixos teores desses nutrientes no solo de antes da mineração podem ser explicados tanto pela absorção desses nutrientes pelas plantas, pelas perdas por percolação e lixiviação (LIU et al., 2017) e principalmente, pela ausência de adubações de manutenção nos 8 anos subsequentes ao plantio (SILVEIRA, 2017). Valores de pH mais elevados em solos recuperados, após mineração, comparados à locais não perturbados podem ser explicados pela exposição ao intemperismo e mineralização da matéria orgânica (GANJEGUNTE et al., 2009). O pH em torno de 6,0 na reabilitação inicial é indicado para o desenvolvimento da maioria das culturas (FAGERIA, 1998). O aumento do pH dos solos de mineração recuperados em relação aos solos naturais também foi relatado em áreas reabilitadas na Índia (JUWARKAR et al., 2010) e na região deste estudo (SILVEIRA, 2017).

### **3.5.3. Resistência mecânica do solo a penetração**

A umidade do solo foi semelhante entre as amostragens da resistência mecânica à penetração antes da mineração ( $31,47\% \pm 1,49$ ) e na reabilitação inicial ( $20,06\% \pm 2,41$ ). Os valores similares da umidade são fundamentais para padronizar seu efeito nos valores de

resistência do solo à penetração (SINNETT et al., 2006). O aumento do teor de umidade provoca uma diminuição na resistência ao cisalhamento e coesão e reflete na maior compressibilidade do solo. A maior influência do aumento do teor de umidade é a diminuição do valor de coesão das argilas do solo em 1-3 kPa e conseqüente redução da resistência mecânica do solo a penetração (PEZOWICZ e CHOMA-MORYL, 2015).

A resistência mecânica do solo à penetração foi semelhante entre as seis amostragens antes da mineração, com um valor máximo de 2413 kPa (repetição 4 na profundidade de 15 cm). As amostragens na área reabilitada variaram consideravelmente, chegando ao limite de 6800 kPa nas amostras 1 e 2 (Figura 17). A resistência média do solo ao penetrômetro foi maior ( $P < 0,001$ ) na reabilitação inicial (2615,83 kPa) que na área de referência, antes da mineração (1222,57 kPa).

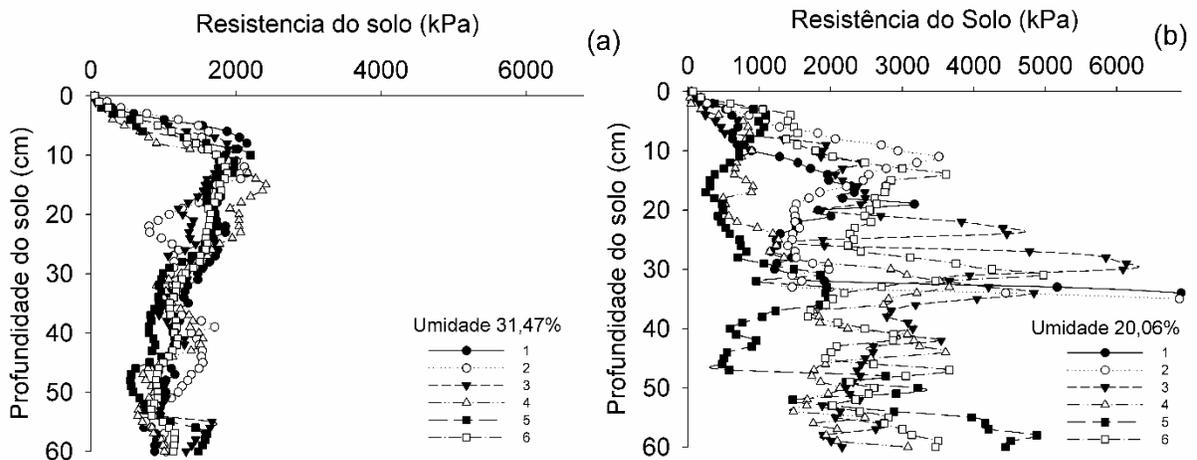


Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração registrados nas seis amostragens antes da mineração (março de 2017) (a) e na reabilitação inicial (março de 2018) (b), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

A diferença no padrão das amostragens da resistência do solo antes da mineração e do solo construído na reabilitação inicial pode ser explicada pelas modificações das propriedades e características físicas do solo causadas pela mineração (BENGOUGH e MULLINS, 1991; CARROLL et al., 2000; SILVEIRA, 2017). O cascalho de saprolito observado abaixo do *topsoil* no perfil do substrato após mineração de bauxita pode explicar as diferenças de resistência entre as duas amostragens (SILVEIRA, 2017). O rearranjo das partículas de saprolito obstruem os poros e sua estrutura apresenta grande resistência mecânica à penetração (SILVEIRA, 2017). Os dois acionamentos que excederam a pressão máxima do equipamento foi mínimo em relação ao

estudo anterior na mesma região, onde todos os acionamentos do penetrógrafo atingiram o valor máximo de pressão do equipamento (SILVEIRA, 2017). Esse resultado demonstra a redução da resistência do solo quando o *ripper* de 60 cm é substituído pelo de 1 m de profundidade na subsolagem, método inovado pela empresa no processo de reabilitação da área deste estudo.

As médias da resistência mecânica do solo à penetração antes da mineração e do substrato na reabilitação inicial apresentaram valores similares até a profundidade de 40 cm, a partir dessa, maiores resistências à penetração foram observados no substrato (Figura 18).

A similaridade até a profundidade de 40 cm pode ser explicada pela reposição da camada de solo orgânico superficial (*topsoil*) da mesma mina. Essa camada de solo pode levar a uma recuperação bem-sucedida, pois, o solo reconstruído terá características similares ao original (MARTIN-MORENO et al., 2016). Os maiores valores de resistência do substrato a partir da profundidade de 40 cm podem estar relacionados à presença de saprolito e ao uso de máquinas pesadas que são identificados como fatores limitantes na recuperação de minas (DARMODY et al., 2009), pois formam zonas compactadas difíceis de reverter (SHEORAN et al., 2010).

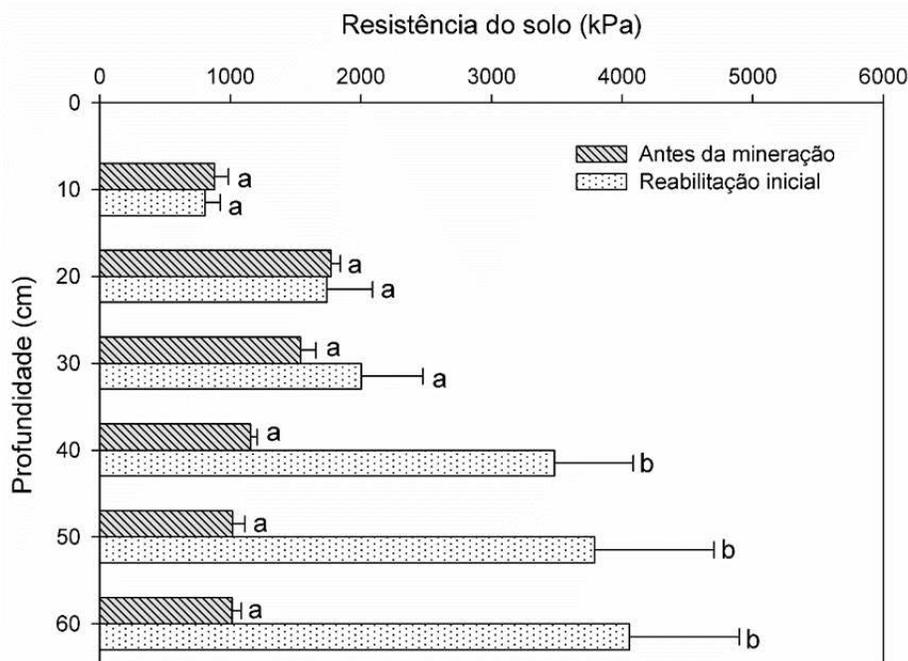


Figura 18. Resistência à penetração do solo antes da mineração e do substrato na reabilitação inicial para cada profundidade. Barra de uma mesma profundidade seguida pela mesma letra indica que os tratamentos não diferem pela análise de variância ( $p$ -valor < 0,05).

As profundidades de 10, 40, 50 e 60 cm apresentaram as menores resistências, e 20 e 30 cm tiveram os maiores valores, antes da mineração (Figura 19a). No substrato da reabilitação

inicial, a resistência à penetração aumentou com a profundidade, 40, 50 e 60 cm foram mais resistentes que a camada de 10 a 30 cm (Figura 19b).

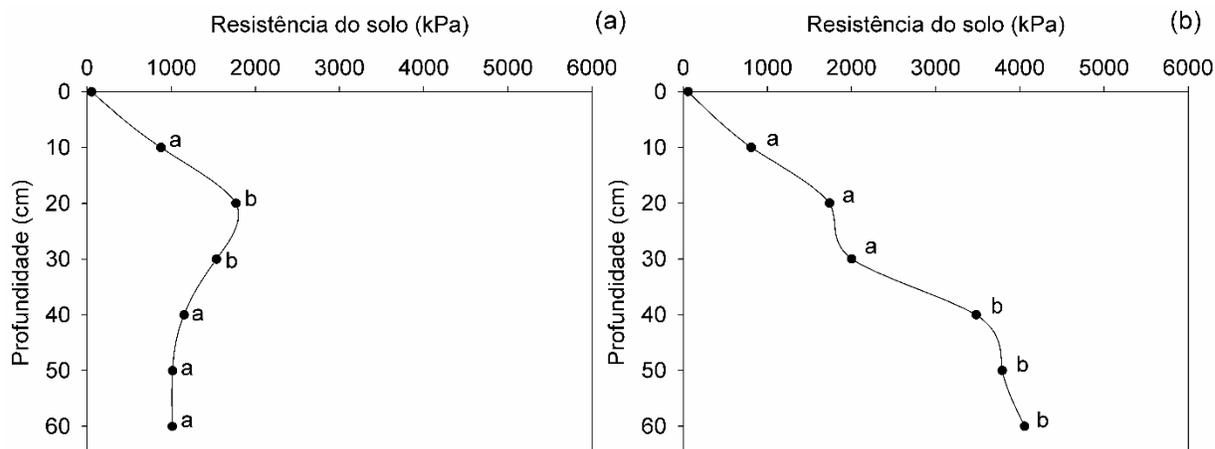


Figura 19. Resistência do solo à penetração entre as profundidades ao longo do perfil de 60 cm, antes da mineração (a); e na reabilitação inicial (b). As letras referem-se aos agrupamentos de resistência entre as profundidades do mesmo tratamento pelo teste de Scott Knott ( $p$ -valor  $<0,05$ ).

Os maiores valores de resistência do solo de 20 e 30 cm antes da mineração podem ser explicados pelo adensamento natural do solo, ou estão relacionados ao histórico de uso de maquinário no preparo do solo para plantio de eucalipto (MARTINS et al, 2002; SHEORAN et al., 2010; KAMIMURA et al., 2012; JESUS et al, 2015). Operações como gradeamento revolvem as camadas superficiais, mas compactam o solo em camadas intermediárias que perdura ao longo do tempo (JESUS et al, 2015). Estudos no mesmo tipo de solo (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico) também constataram o aumento dos valores de resistência do solo à penetração na camada de 20 e 30 cm de profundidade em plantio de eucalipto (PIRES et al., 2006; CÂNDIDO et al., 2014). Portanto, esse adensamento pode ser considerado comum em áreas com plantio de eucalipto e sem mineração.

A variação da resistência entre as profundidades do substrato na reabilitação inicial pode ser explicada pela sua heterogeneidade ao longo do perfil ao ser reconstruído após a mineração (BENGOUGH e MULLINS, 1991). Essa mudança no solo pela reestruturação dos horizontes, pois pode remanescer concreções de minério (saprolito), e é explicada pelo aumento do índice de pedregosidade em profundidades maiores que 20 cm (BARROS et al., 2013). O uso de escavadeira com lança de 12,8 m e uma concha com dentes para afrouxamento do solo foi mais

eficiente em reduzir a resistência do solo que aqueles tratados com o *ripper* de 80 cm (SINNETT et al., 2006; SINNETT et al., 2008). Embora haja redução eficiente da resistência do solo com o uso dessa metodologia, o seu grande custo enfatiza a importância de evitar a compactação do solo no estágio de colocação do solo no processo de restauração (SINNETT et al., 2006; SINNETT et al., 2008). O aumento do *ripper* de 60 cm em reabilitações anteriores na mesma região (SILVEIRA, 2017) para 1 m nesse estudo reduziu a resistência do solo. Demonstrando que o aprimoramento de metodologias na reabilitação das áreas mineradas pode auxiliar no restabelecimento dos processos hidrológicos desses ecossistemas.

A resistência do solo obtida nos dois tratamentos é uma indicação quantitativa da resistência à penetração experimentada pelas raízes em solos (BENGOUGH e MULLINS, 1991). O limite de restrição ao crescimento de raiz é de 2 Mpa (2000 kPa) e os valores de resistência à penetração sugerem que o enraizamento seria restrito em profundidades relativamente rasas (a partir de 30 cm) no substrato da reabilitação inicial (SINNETT et al., 2008). Entretanto, em uma mina pós lavra de bauxita na mesma região foi observado o crescimento de raízes de eucalipto em profundidades maiores que 60 cm mesmo excedendo esse valor de resistência em todas as medições (SILVEIRA, 2017). A resistência na reabilitação inicial pode limitar o crescimento de raízes, mas o eucalipto conseguiu superar essa restrição, indicando que os maiores valores de resistência podem ser pontuais devido à presença de concreções.

As camadas compactadas torna o solo mais resistente à penetração biológica e inibe o movimento da água e do ar ocasionando aumento no escoamento superficial. O substrato após a mineração é mais frágil em relação ao solo original, porém, após alguns anos, a camada compactada diminui, em parte devido aos processos geomorfológicos naturais (HAIGH e SANSOM, 1999). Portanto, o solo pode ser reconstruído, após a mineração, a partir desses processos.

#### **3.5.4. Infiltração de água no solo**

A umidade do solo antes da mineração ( $27,54\% \pm 0,75\%$ ) na camada de 0 a 20 cm foi igual à do substrato na reabilitação inicial ( $25,43\% \pm 1,55\%$ ) nos respectivos dias dos testes de infiltração. A similaridade entre as umidades permite comparar as taxas de infiltração, pois, as condições iniciais de umidade do solo podem alterar o total de água infiltrada, mesmo não influenciando na taxa de infiltração estável (RUGGENTHALER et al., 2016).

A taxa de infiltração inicial do substrato na área em reabilitação ( $2620 \pm 358,14 \text{ mm h}^{-1}$ ) foi semelhante a do solo original de antes da mineração ( $1360 \pm 279,04 \text{ mm h}^{-1}$ ) (Figura 20a). A capacidade de infiltração e taxa de infiltração estável também foram iguais entre as amostragens de antes da mineração e da reabilitação inicial (Figura 20b e c).

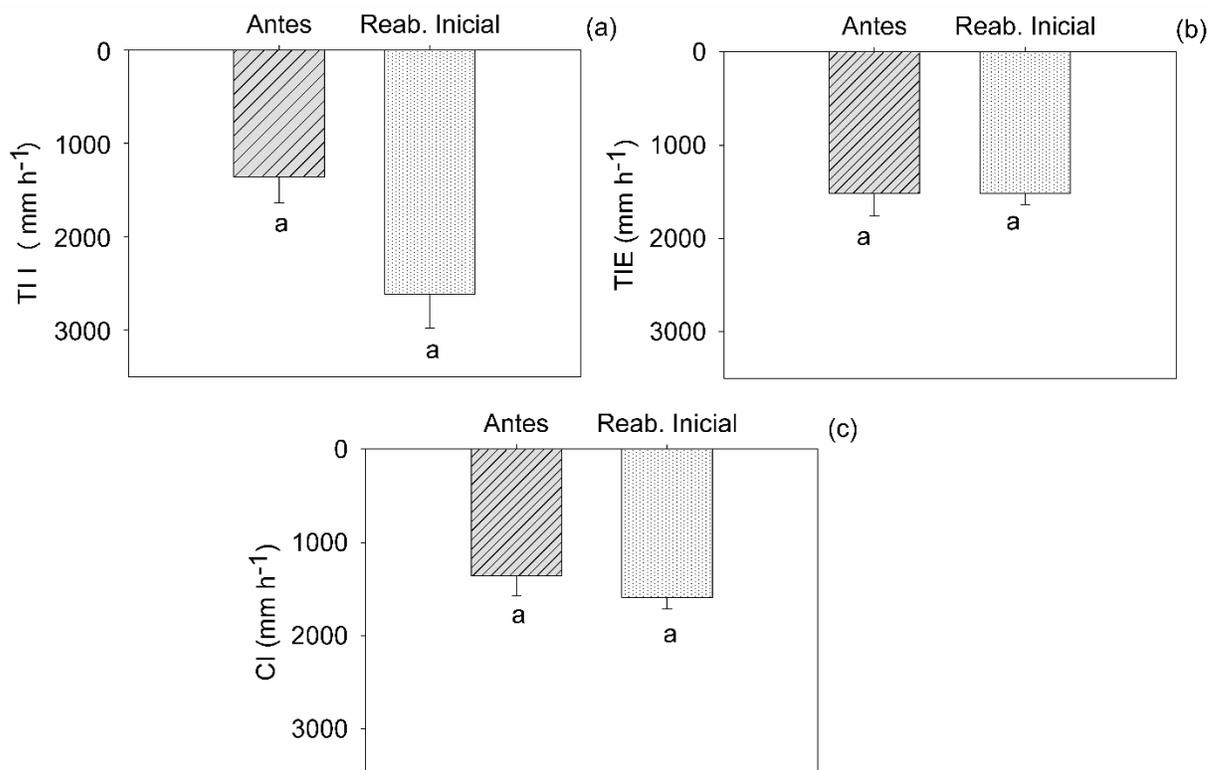


Figura 20. Taxa de Infiltração Inicial (TII) (a); Taxa de infiltração estável (TIE) (b); e Capacidade de infiltração (CI) (c) antes da mineração (maio de 2017) e na reabilitação inicial (maio de 2018), no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

Os valores semelhantes da taxa de infiltração inicial, capacidade de infiltração e taxa de infiltração estável podem ser explicados pela reposição das camadas do solo estéril e do *topsoil*. Essas camadas sem estrutura e com partículas de solo soltas permitem uma alta taxa de infiltração (HUANG et al., 2015). A subsolagem cruzada realizada na reabilitação, associada ao rearranjo de cascalhos ou matacões com as partículas do solo aumentam os espaços vazios, fendas e rachaduras abaixo da superfície, o que mantém a taxa de infiltração do substrato elevada e próxima a do solo original (SILVA e CORRÊA, 2010). Essas fissuras e fendas atuam como caminhos preferenciais por onde a água se movimenta com pouca resistência, semelhante aos canais biológicos das raízes no solo original (EVANS et al., 2015). A infiltração nas superfícies de minas de carvão na Grã-Bretanha demonstrou que áreas mantidas com uma camada profunda

e bem manejadas de solo superficial absorvem a maior parte da água das chuvas. Os macroporos e as fissuras abaixo do solo superficial são os principais responsáveis pela elevada infiltração (HAIGH e SANSOM, 1999). Demonstrando que a presença dessas características no substrato da reabilitação inicial pode explicar a semelhança de infiltração com o solo original.

A infiltração encontrada na reabilitação inicial é semelhante a outros estudos feitos em sistemas reabilitados após mineração de superfície (SHRESTHA et al. 2005, REYNOLDS e REDDY, 2012, SILVEIRA, 2017). Em que, as taxas de infiltração foram semelhantes ou mais elevadas em terras reabilitadas do que na vegetação de referência circundante (SHRESTHA et al. 2005, REYNOLDS e REDDY, 2012, SILVEIRA, 2017). O uso de práticas de recuperação bem-sucedidas como reposição de *topsoil*, subsolagem e escarificação tentam criar ecossistemas funcionais, após a mineração, e apesar do ambiente não retornar exatamente como antes, a reabilitação inicial permite boa infiltração de água no solo (REYNOLDS e REDDY, 2012). Portanto, o uso dessas técnicas na reabilitação da área desse estudo pode explicar os resultados satisfatórios de infiltração.

### 3.6. Coeficiente de correlação e análise de componentes principais

O escoamento superficial da reabilitação inicial apresentou correlação positiva com a quantidade e intensidade de precipitação e negativa com a duração da chuva. Para a quantidade e intensidade de precipitação essa correlação foi significativa ( $p$ -valor < 0,05). Na área de referência, os coeficientes de correlação apresentaram comportamento similar ao da reabilitação inicial, mas essa relação não foi significativa (Tabela 5).

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson ( $r^2$ ) e  $p$ -valor (<0,05) entre o escoamento superficial e as variáveis de precipitação antes da mineração e durante a reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil

Variável	Antes da mineração	Reabilitação inicial
Precipitação (mm)	0,62 (0,27)	0,94 (0,02)
Intensidade de precipitação (mm h <sup>-1</sup> )	0,42 (0,48)	0,96 (0,01)
Duração dos eventos de chuva (horas)	0,18 (0,77)	-0,37 (0,54).

A correlação positiva entre a chuva e o escoamento indica que o aumento na chuva eleva volume do escoamento superficial (NIGAM et al, 2017). Resultados anteriores mostraram essa mesma correlação em avaliação de campo nas minas a céu aberto na área de Chirimiri,

Chhattisgarh, Índia (NIGAM et al, 2017) e nas minas a céu aberto na mesma região deste estudo (SILVEIRA, 2017). A correlação negativa do escoamento superficial com a duração da chuva na reabilitação inicial indica que os maiores escoamentos foram gerados por chuvas de curta duração, porém, de alta intensidade (MOHAMADI; KAVIAN, 2015).

A análise de componentes principais dos fatores que interferem no escoamento superficial na área de referência (antes da mineração), explicou 68,56% da variabilidade total nas duas primeiras componentes, onde 38,00 % da variância estão explicados pela componente 1. Os maiores auto-vetores além da quantidade, intensidade e duração da precipitação foram para as variáveis do solo, dentre elas, a resistência mecânica do solo à penetração, densidade do solo e a porosidade total do solo (Figura 21).

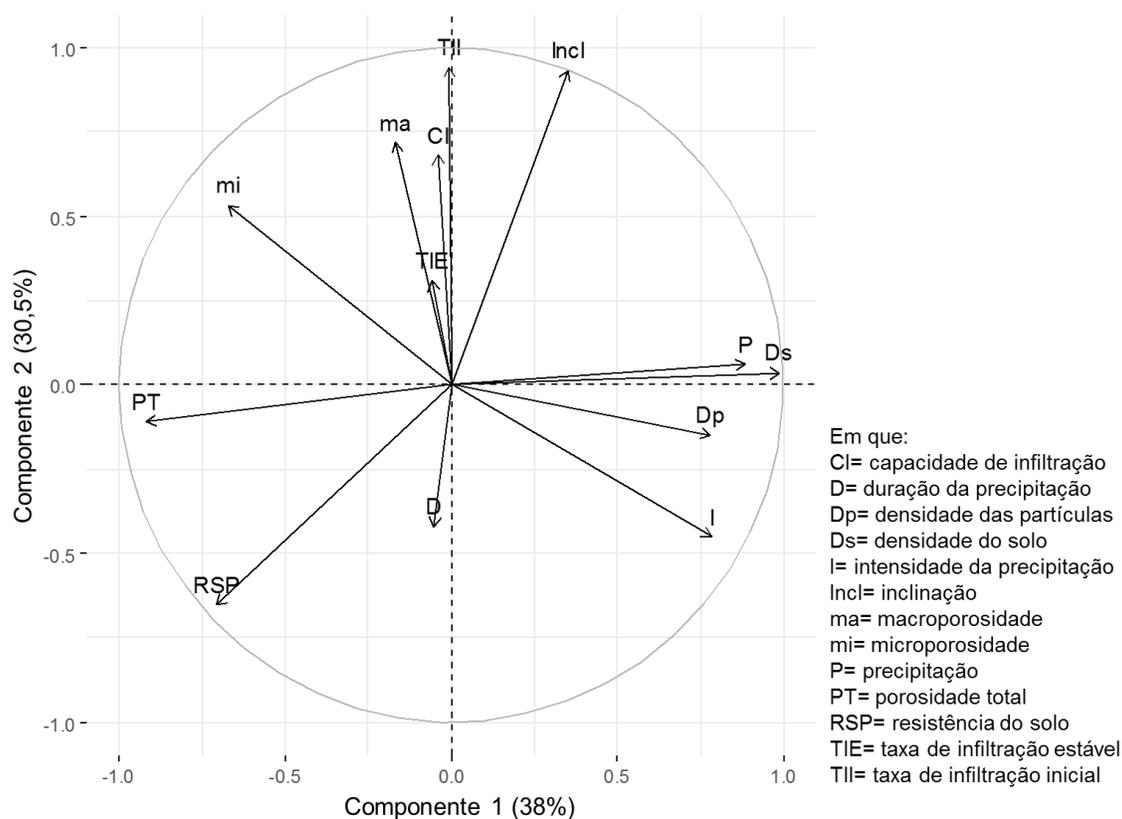


Figure 21. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na área de referência antes da mineração no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

Os maiores auto-vetores para as propriedades do solo na análise dos componentes principais da área de referência evidencia a elevada influência da estrutura do solo nos valores de escoamento superficial (HUMPHREYS et al., 2013). Quando a intensidade de precipitação

excede a taxa de infiltração, formando uma lâmina de água na superfície, é o solo que controla a infiltração e as partições de água convertidas em escoamento, por isso, suas propriedades são bastante explicativas nessa análise para o solo original (HUMPHREYS et al., 2013).

A análise de componentes principais dos fatores que interferem no escoamento superficial da reabilitação inicial, explicou 83,53% da variabilidade total nas duas primeiras componentes, sendo que 57,93% da variância esta explicada pelo eixo 1 (Componente 1) e 25,60% pelo 2 (Componente 2). Na componente 1 as variáveis do solo formaram dois grupos, um com scores negativos e outro com positivos, ambos com variáveis autocorrelacionadas. Na componente 2, os maiores auto-vetores, além da quantidade e intensidade precipitação, foram da inclinação e da rugosidade da superfície, que não foram autocorrelacionadas (Figura 22).

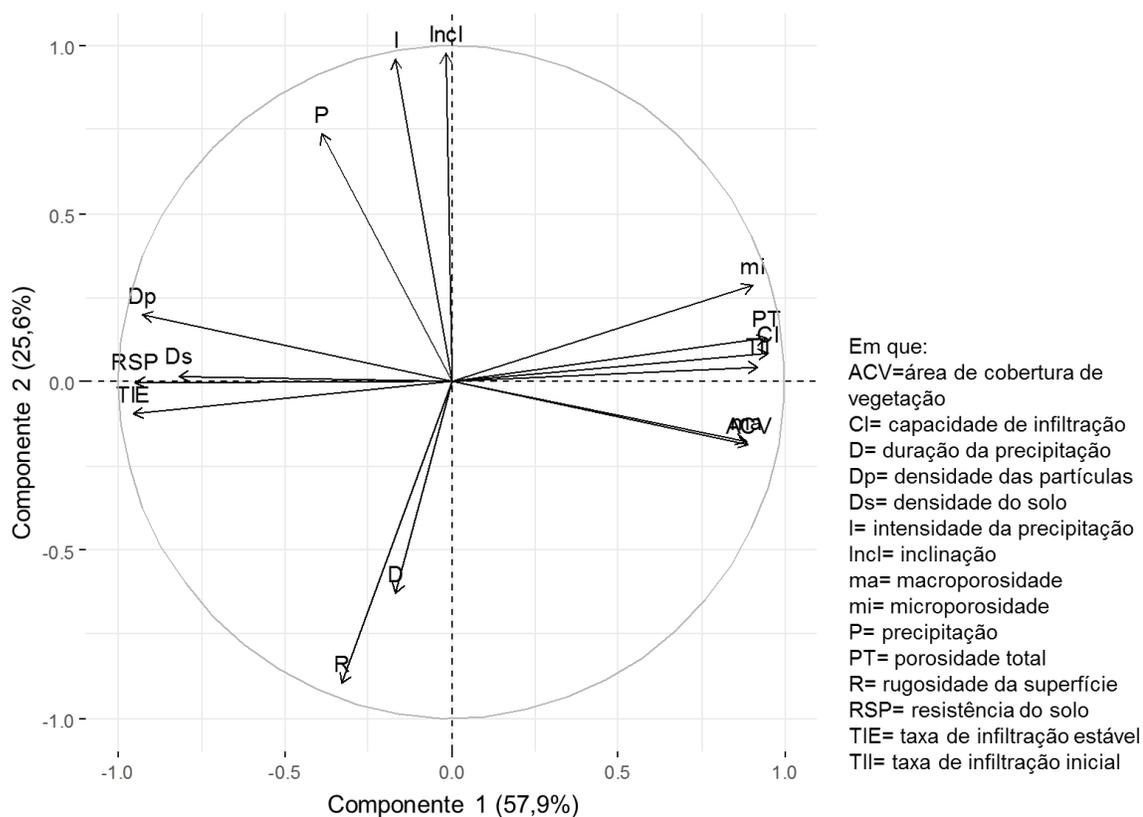


Figure 22. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial da reabilitação inicial no município de Rosário da Limeira, Minas Gerais, Brasil.

Os dois grupos das propriedades do solo na análise de componentes principais evidenciaram que as mudanças do solo pela mineração de bauxita fizeram com que essas se tonassem correlacionadas (SHRESTHA e LAL, 2011), podendo influenciar com os mesmos

scores nos dados de escoamento. Os maiores auto-vetores da inclinação e da rugosidade da superfície, indica a alta explicação desses dois fatores na redução do escoamento superficial na área de reabilitação inicial (PIRES et al, 2006; FANG et al., 2015). A redução da declividade (FANG et al., 2015) e aumento de rugosidade do solo em nível reduzem o escoamento superficial (BRAMORSKI et al., 2012), por isso, permitiram que o escoamento fosse menor na reabilitação inicial que na área de referência.

#### **4. CONCLUSÃO**

A reabilitação inicial reduziu o escoamento superficial em relação ao escoamento de referência, antes da mineração.

As atividades de mineração causaram mudanças estruturais na camada superficial do solo, evidenciada pelo aumento da resistência do solo a penetração, aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade total e macroporosidade do solo. A redução da inclinação e o aumento da rugosidade da superfície foram os principais responsáveis pela redução do escoamento superficial na reabilitação inicial.

As propriedades químicas do solo foram alteradas na reabilitação inicial como aumento do teor de nutrientes e diminuição da matéria orgânica. O tipo de vegetação, porcentagem de cobertura e padrão espacial das plantas também foi alterado.

Na reabilitação, a topografia construída e condições de solo e planta que, embora não foram idênticas ao local antes da mineração, permitiram o funcionamento adequado dos processos hidrológicos com consequente redução do escoamento superficial.

A continuidade do estudo é necessária para monitorar o escoamento na área de reabilitação inicial e verificar o comportamento do escoamento ao longo do tempo, nas diferentes fases do crescimento do eucalipto.

## Capítulo 2

### Escoamento superficial em dois períodos de reabilitação de mina de bauxita no sudeste de Minas Gerais, Brasil

#### Resumo

A reabilitação de áreas mineradas objetiva desenvolver condições edáficas e características da vegetação que tornem o ambiente sustentável. O escoamento superficial é um dos processos afetados pela mineração e que necessita de monitoramento para verificar se a reabilitação foi bem-sucedida. O objetivo foi monitorar e comparar o escoamento superficial aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação de área de mineração de bauxita. Sete parcelas, em uma área de mina de bauxita reabilitada com plantio de eucalipto, foram alocadas para coleta de escoamento superficial e monitoradas aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação após a mineração. Os fatores físico-ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial foram caracterizados nos dois períodos e submetidos à análise de componentes principais (ACP). O coeficiente de escoamento superficial médio aos 2,5 anos foi 0,17% ( $\pm 0,37\%$ ) e igual ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) ao da idade de 3,5 anos (0,12%  $\pm 0,26\%$ ) de reabilitação. Ambos coeficientes de escoamento superficial foram menores do que o de área de plantio de eucalipto sem mineração (0,56%) na região e na mesma faixa de declividade. A área de projeção das copas, diâmetro dos fustes de eucalipto, a serapilheira acumulada e sua capacidade de retenção hídrica aumentaram de 2,5 para 3,5 anos de reabilitação. O aumento da cobertura de eucalipto, de serapilheira e matéria orgânica são devido ao crescimento e maior porte das árvores, que potencializa elevada produção e deposição de folhas no solo. As taxas e a capacidade de infiltração e os parâmetros físicos do solo foram pouco alterados entre os períodos. Os parâmetros físicos do solo foram pouco alterados entre as amostragens devido aos longos períodos demandados para modificação. Os teores disponíveis de nutrientes reduziram e a matéria orgânica aumentou. As taxas de infiltração aos 2,5 e a porcentagem de cobertura de vegetação aos 3,5 anos foram os fatores determinantes na ACP. O sucesso do estabelecimento da vegetação já no primeiro período avaliado pode explicar os valores semelhantes de escoamento superficial. A combinação de boas condições edáficas e a rápida cobertura das plantas propiciaram bons resultados hidrológicos para os ecossistemas reabilitados após mineração de bauxita.

Palavras-chave: Minas a céu aberto; Hidrologia, períodos de reabilitação.

## Chapter 2

### **Surface runoff in two periods of bauxite mine rehabilitation in southeastern Minas Gerais, Brazil**

#### **Abstract**

The rehabilitation of mined areas aims to develop edaphic conditions and vegetation characteristics that make the environment sustainable. Surface runoff is one of the processes affected by mining and requires monitoring to verify that the rehabilitation was successful. The objective was to monitor and compare the runoff at 2.5 and 3.5 years of rehabilitation of the bauxite mining area. Seven plots in a rehabilitated bauxite mine area with eucalyptus plantation were allocated to surface runoff collection and monitored at 2.5 and 3.5 years of rehabilitation after mining. Physical-environmental and anthropogenic factors that interfere with surface runoff were characterized in both periods and submitted to principal component analysis (PCA). The mean surface runoff coefficient at 2.5 years was 0.17% ( $\pm 0.37\%$ ) and the same (p-value  $<0.05$ ) at the age of 3.5 years ( $0.12\% \pm 0, 26\%$ ) of rehabilitation. Both surface runoff coefficients were lower than the eucalyptus plantation area without mining (0.56%) in the region and in the same slope. The area of crown projection, diameter of eucalyptus shafts, accumulated litter and water retention capacity increased from 2.5 to 3.5 years of rehabilitation. The increase of eucalyptus, litter and organic matter cover is due to the growth and greater size of the trees, which potentiates high production and deposition of leaves in the soil. The physical parameters of the soil were little altered between the samplings due to the long periods demanded for modification. Available nutrient contents reduced and organic matter increased. The infiltration rates at 2.5 and the percentage of vegetation cover at 3.5 years were the determining factors in the PCA. The success of vegetation establishment already in the first evaluated period may explain similar values of surface runoff. The combination of good soil conditions and the rapid coverage of the plants provided good hydrological results for the ecosystems rehabilitated after bauxite mining.

**Keywords:** Open pit mines; Hydrology, rehabilitation periods.

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração superficial causa alterações na paisagem, no solo e nos processos hidrológicos, mas a recuperação de áreas mineradas pode garantir o funcionamento adequado do ecossistema após mineração (BARROS et al., 2012; LIU et al., 2017). Um desafio importante no processo de reabilitação, após a mineração a céu aberto, é o controle do escoamento superficial de água (RUBIO et al., 2013). Assim, avaliar as mudanças das propriedades do solo e da vegetação, associadas aos processos hidrológicos, como escoamento superficial, em minas reabilitadas é essencial para entender e aprimorar as técnicas utilizadas na reabilitação (SHRESTHA e LAL, 2011).

A busca pela sustentabilidade dos ambientes minerados exige boas técnicas de reabilitação (SINNETT et al., 2008). A revegetação é uma delas e o restabelecimento da vegetação pode ser uma indicação de que os processos ecossistêmicos foram restaurados (BANNING et al., 2008). O bom manejo do solo associado às mudanças nas condições edáficas e de vegetação podem induzir a resultados ecológicos benéficos nos ecossistemas reabilitados ao longo do tempo (SHEORAN et al., 2010).

Longos períodos de amostragens são necessários para verificar as mudanças no solo de terras mineradas, mas o monitoramento em intervalos curtos é importante (CHEN et al., 2011), pois podem verificar os mecanismos envolvidos na reabilitação e avaliar se esses são satisfatórios (AUDET et al., 2013). Ao longo do processo de reabilitação os solos se transformam e suas condições estruturais melhoram, podendo aumentar a infiltração e favorecer o estabelecimento da vegetação reduzindo as perdas de água por escoamento superficial (REYNOLDS e REDDY, 2012), mas experimentos de campo ainda são necessários para tal afirmação (LOCH, 2000).

O retorno a um ecossistema funcional, semelhante ou melhor que a pré-perturbação é o objetivo da reabilitação após a mineração de superfície (REYNOLDS e REDDY, 2012). O monitoramento cronológico do escoamento superficial em áreas reabilitadas pode indicar se essa meta foi alcançada.

O objetivo foi monitorar o escoamento superficial em área reabilitada após dois anos da mineração de bauxita; comparar o escoamento superficial de 2,5 com o de 3,5 anos de reabilitação, após mineração de bauxita; e, caracterizar os fatores físico-ambientais e antrópicos que interferem no escoamento.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em uma mina de bauxita reabilitada ( $21^{\circ}3'57.84''S$ ,  $42^{\circ}35'42.38''W$ ) no município de Mirai, sudeste de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). O clima da região é Cwb na classificação de Köppen com duas estações bem definidas, o verão chuvoso e o inverno seco. A precipitação média anual é de 1.336 mm e temperatura média anual de  $19,3^{\circ}C$  (ALVAREZ et al., 2013). O tipo de vegetação é Estacional Semidecidual, fisionomia florestal e estratificada da Mata Atlântica que perde 25-50% das folhas do dossel no período seco (ARRUDA et al., 2018). Os solos predominantes são Latossolos Vermelho-Amarelo distrófico típico (BORGES, 2013). O relevo é acidentado com faixas de morros e topos de bauxita, fazendo parte da faixa de rochas granulíticas denominadas de Complexo Juiz de Fora (LOPES e CARVALHO, 1990).

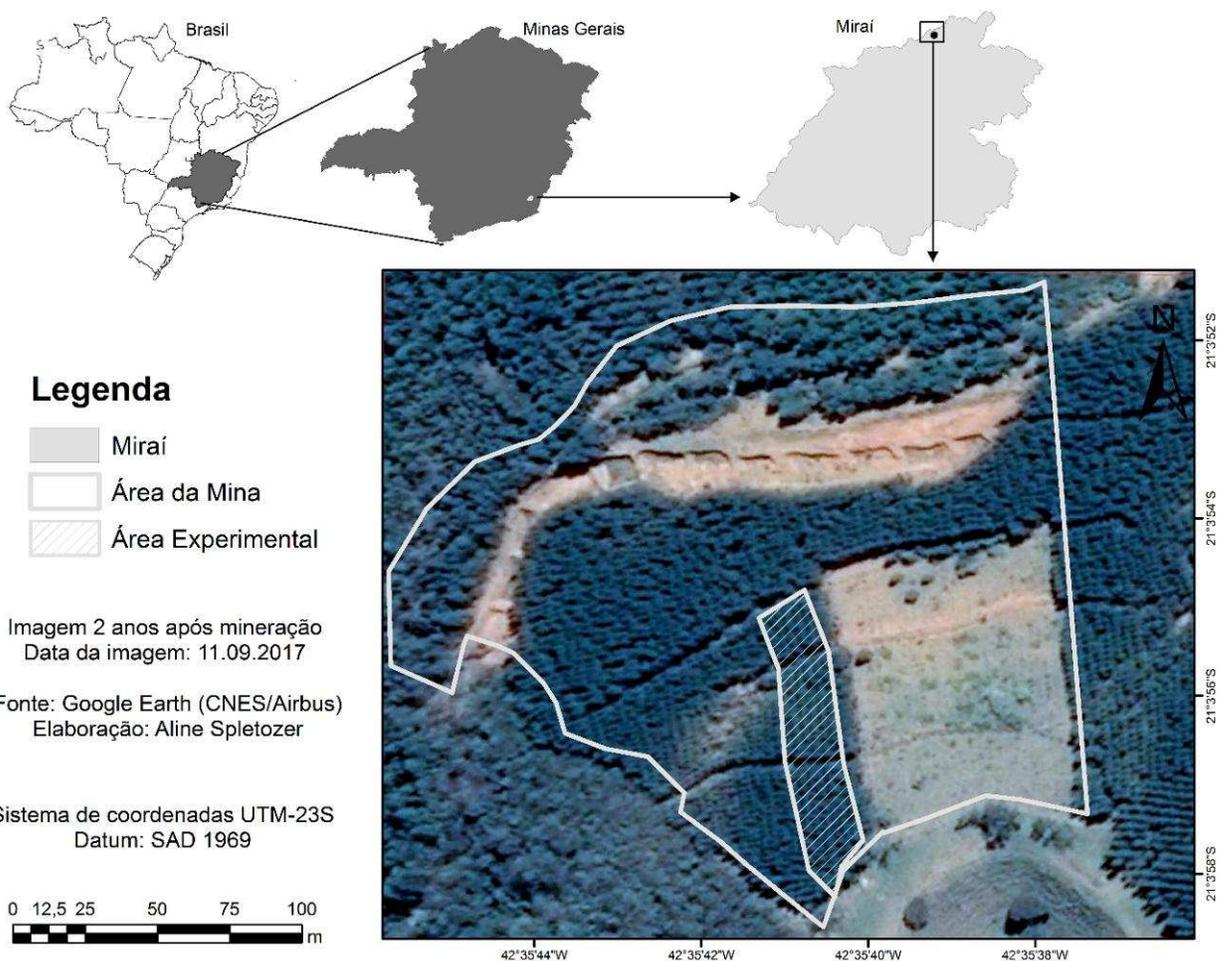


Figura 1. Localização da área experimental na área da mina reabilitada no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil (imagem de setembro de 2017).

A propriedade rural da área de mina de bauxita foi arrendada pela empresa mineradora. A bauxita foi extraída de julho de 2013 a julho de 2014, a reconformação topográfica foi feita de agosto a novembro de 2014 e a revegetação realizada em dezembro de 2014. A calagem e fosfatagem foram realizadas antes do plantio nas proporções de 4.000 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 2.000 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato natural reativo, respectivamente. O plantio clonal de *Eucalyptus* (híbrido AEC I144) em espaçamento 2 x 3 m foi realizado em nível com aplicação de 300 gramas de NPK (04-14-08) por muda. *Brachiaria* sp. foi semeada à lanço nas entre linhas de *Eucalyptus*. Os tratos silviculturais de manutenção foram: replantio de falhas, adubação de cobertura e combate às formigas.

## 2.2. Escoamento superficial

Sete parcelas foram instaladas em outubro de 2016 na área experimental com declividade de 10° a 15,5°, 22 meses após o plantio. O escoamento superficial foi monitorado de outubro de 2016 a maio de 2018. O início do monitoramento em outubro (mês de início das chuvas) foi selecionado com base nas precipitações do ano hidrológico, definido a partir da série histórica de 60 anos (1956-2016) dos dados de vazão mínima e precipitação disponibilizados pela Agência Nacional de águas (ANA, 2018) da estação fluviométrica (58910000) e pluviométrica (02142004) localizadas próximas a área de estudo (Figura 2).

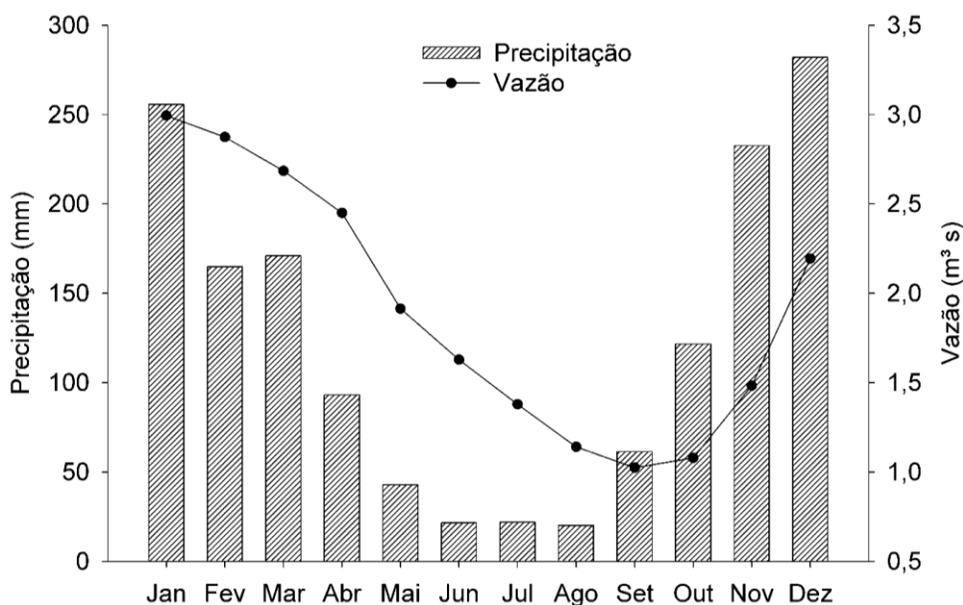


Figura 2. Médias mensais da precipitação acumulada mensal e vazões mínimas da série histórica de 60 anos da região da área da mina reabilitada, município de Mirai, Minas Gerais, Brasil.

Outubro a maio foi definido como o período de maior precipitação do ano hidrológico para comparar o escoamento superficial em dois momentos da reabilitação após a mineração de bauxita (Figura 2). O escoamento superficial gerado na reabilitação aos 2,5 anos (eucalipto de 22 a 29 meses de idade - outubro de 2016 a maio de 2017) foi comparado com o escoamento superficial gerado aos 3,5 anos (eucalipto de 32 a 39 meses de idade - outubro de 2017 a maio de 2018). O escoamento superficial da área foi avaliado sob chuva natural nos dois períodos (Figura 3)

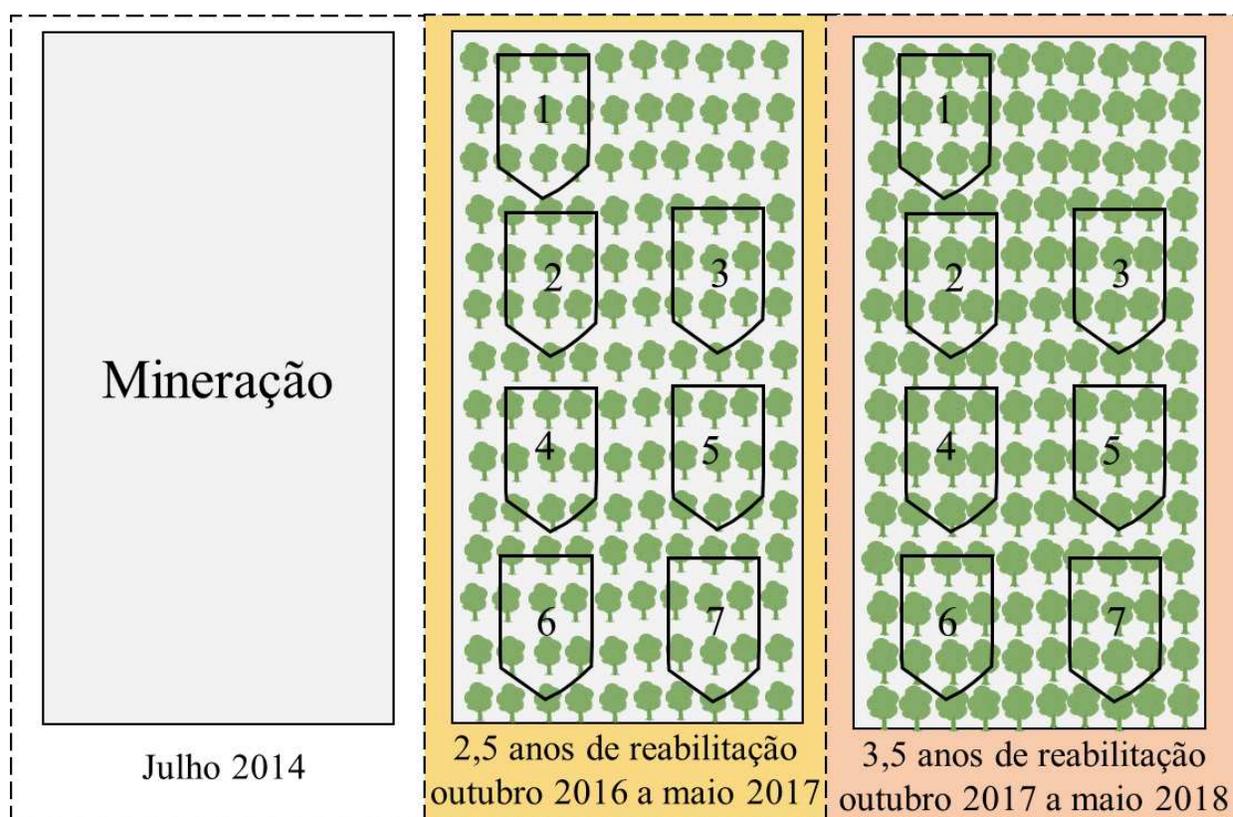
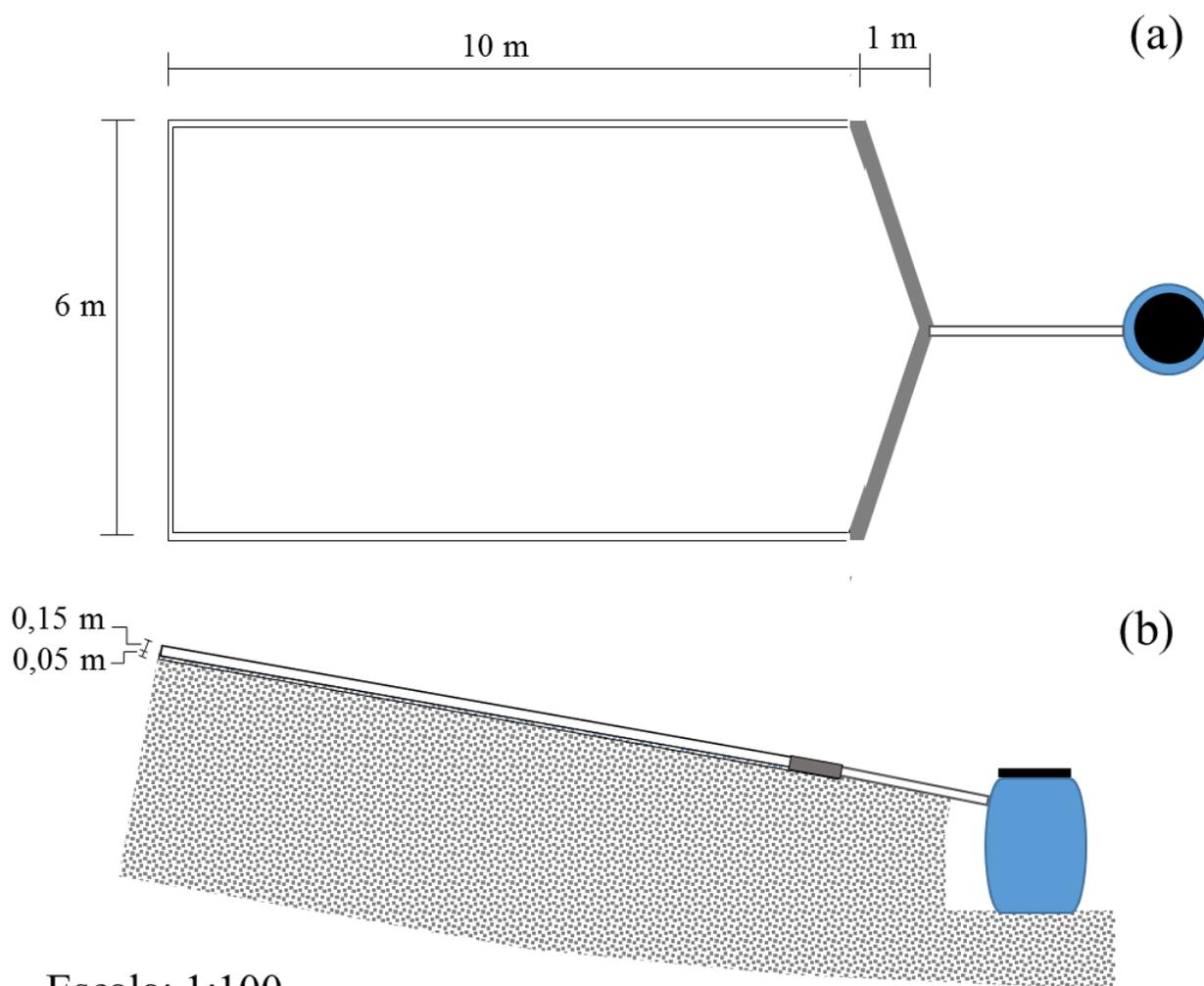


Figura 3. Croqui do design experimental com a distribuição das parcelas na área reabilitada com 2,5 anos e com 3,5 anos após a mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil.

O escoamento superficial foi monitorado em 7 parcelas com dimensões de 10 x 6 m mais um afunilamento triangular de 1 m de altura a partir de sua base instaladas no segundo ano da reabilitação (outubro de 2016), após mineração de bauxita. As parcelas foram demarcadas com auxílio de uma trena de 50 m pelo método de triangulação e delimitadas por chapas de policloreto de polivinila (PVC). O afunilamento triangular foi construído de alvenaria no extremo de menor altitude (sentido do escoamento) para direcionamento da água. No final do afunilamento foi

instalado um cano para conduzir a água até um recipiente com capacidade de 100 litros (bombona) para armazenamento do volume de água escoado (Figura 4).



Escala: 1:100

Figura 4. Estrutura das parcelas de coleta do escoamento superficial no sentido transversal (a) e sentido longitudinal (b).

O volume de água escoado nas parcelas foi mensurado após eventos de chuva, sendo cada coleta constituída de uma ou mais chuvas. O volume do escoamento superficial foi medido com um balde transparente graduado de 10 litros, e uma proveta plástica transparente de 1 litro graduada a cada 10 mililitros.

O escoamento superficial por parcela foi calculado considerando o volume escoado em relação à área de contribuição de cada parcela (variaram de 61,46 a 62,22 m<sup>2</sup>), usando a equação:

$ES = V/A$ , em que: ES é o escoamento superficial em mm, o V é o volume de água do escoamento, coletado em litros e A é a área da parcela em m<sup>2</sup>.

O coeficiente de escoamento superficial por coleta foi calculado pela equação:  $CE = ES/P$ , em que: CE é o coeficiente de escoamento, ES é o escoamento superficial medido em mm, e P é a precipitação que gerou o escoamento em mm. O CE foi multiplicado por 100 para obter o valor em porcentagem.

O escoamento superficial foi monitorado em um ano civil, do segundo para o terceiro ano de reabilitação da área (janeiro a dezembro de 2017) e comparado em dois períodos de maior precipitação, correspondendo à 2,5 (outubro de 2016 a maio de 2017) e 3,5 anos de reabilitação (outubro de 2017 a maio de 2018) na mesma área experimental.

As médias do ES entre as parcelas por coleta foram calculadas e somadas para a análise gráfica mensal. Os CE mensais foram analisados quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e depois submetidos à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar a diferença entre a reabilitação de 2,5 anos com a de 3,5 anos.

## **2.3. Fatores que interferem no escoamento superficial**

### **2.3.1. Características da precipitação**

A quantidade e intensidade da precipitação foram medidas por um pluviógrafo modelo RainLog 2.0 da RainWise<sup>®</sup>Inc instalado à 50 m da área experimental e descarregado para planilha Excel após os eventos de chuva de grandes intensidades ou quinzenalmente para períodos de menor intensidade.

A quantidade da precipitação em aberto também foi mesurada usando um pluviômetro com 176,71 cm<sup>2</sup> de captação, instalado cerca de 40 m das parcelas, à céu aberto. A precipitação interna foi coletada em quatro pluviômetros (176,71 cm<sup>2</sup> de captação) instalados dois entre plantas e dois entre linhas de plantio, e próximos às parcelas.

O volume de chuva coletado nos pluviômetros foi medido com uma proveta graduada (mililitros) após as precipitações, constituindo cada coleta de uma ou mais chuvas. Esse volume foi transformado em altura de lâmina de chuva pela equação:  $P = V/A$ , em que: P é a precipitação em mm, V é o volume de chuva coletado em litros e A é a área de captação do pluviômetro em m<sup>2</sup>.

Os dados exportados do pluviógrafo para planilha do Excel foram tratados e usados para análise gráfica. A quantidade de precipitação obtida diariamente em mm foi somada para obter o total mensal. A intensidade de precipitação foi obtida por evento de chuva em mm h<sup>-1</sup> e usada para calcular a intensidade média e máxima mensal, assim como o desvio padrão.

### 2.3.2. Cobertura vegetal

O diâmetro dos caules e a área das copas foram mensurados para caracterizar a cobertura de *Eucalyptus* sp. em três parcelas previamente sorteadas aos 2,5 (fevereiro de 2017) e 3,5 anos (fevereiro de 2018) de reabilitação. A circunferência do fuste da planta, na altura de 1,30 m (*cap*), e o raio de projeção das copas foram medidos com uma fita métrica.

Os diâmetros na altura de 1,30 m do solo (*dap*) foram calculados pela equação:  $dap = cap / \pi$ , em que: *cap* é a circunferência das plantas medida na altura de 1,30 m do solo e  $\pi$  (Pi) é uma constante. O raio de projeção das copas foi usado para calcular a área de projeção da copa (A) pela equação:  $A = (\pi/4) * rc^2$  onde: *rc* é o raio da copa (m) e  $\pi$  (Pi) uma constante. A área de projeção das copas foi estimada por hectare (ha) para comparar a cobertura de vegetação da reabilitação de 2,5 anos com a de 3,5 anos.

### 2.3.3. Serapilheira

Três amostras de serapilheira aos 2,5 (maio de 2017) e 3,5 anos (maio de 2018) de reabilitação foram coletadas para verificar sua capacidade de retenção hídrica (CRH). Um gabarito quadrangular de 0,25 m<sup>2</sup> foi lançado ao acaso próximo às parcelas coletoras de escoamento superficial e toda a serapilheira depositada sobre a superfície do solo (folhas, ramos, gravetos e frutos secos) foi coletada.

A massa saturada (depois de submersas em água por 72 horas) e a massa seca (em estufa à 75 °C com circulação forçada de ar) das amostras foram mensuradas para calcular a capacidade de retenção hídrica (CRH) da serapilheira.

A capacidade de retenção hídrica (CRH) da serapilheira foi calculada pela expressão:  $CRAS = (MSaturada - MSeca) / MSeca$  em que: *MSaturada* é a massa da amostra saturada (kg) e *MSeca* é a massa da amostra seca em estufa (kg). A média das *MSeca* foi considerada como a quantidade de serapilheira produzida em cada período e calculada por hectare (Kg/ha) usando regra de três simples.

As médias das CRH e *MSeca* da serapilheira foram analisadas quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e submetidas à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar diferenças entre 2,5 anos e 3,5 anos da reabilitação.

#### **2.3.4. Atributos do solo**

##### **2.3.4.1. Físicas do solo**

A textura, a densidade, a macro e microporosidade, a porosidade total e a densidade de partícula do substrato aos 2,5 anos e 3,5 anos da reabilitação foram analisadas para caracterizar seus atributos físicos e explicar os dados do escoamento superficial (EMBRAPA, 2017).

Quatro amostras deformadas na profundidade de 0-10 cm e distantes 1,5 m da lateral de parcelas aleatórias foram coletadas com trado tipo “holandês” para avaliar a textura e a densidade de partículas. Os tamanhos granulométricos de areia grossa (2,0 - 0,2 mm), areia fina (0,2 - 0,02mm), silte (0,02-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) foram considerados para textura. As demais análises foram medidas em quatro amostras indeformadas coletadas em anel volumétrico com trado de “Uhland” com os mesmos critérios de amostragem usados nas coletas das amostras deformadas.

As amostragens aos 2,5 anos e 3,5 anos da reabilitação foram realizadas em março de 2017 e março de 2018, respectivamente. As médias das características físicas do substrato foram analisadas quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e submetidas à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar diferenças entre 2,5 anos e 3,5 anos da reabilitação.

##### **2.3.4.2. Química do solo**

Amostras compostas de 12 pontos, em zig-zag, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, foram coletadas aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos (março de 2018) da reabilitação utilizando um trado do tipo “holandês” para caracterizar a fertilidade do substrato por análise química de rotina e de matéria orgânica (EMBRAPA, 2017).

##### **2.3.4.3. Infiltração de água no solo**

A taxa de infiltração (TI), capacidade de infiltração (CI) e a taxa de infiltração estável (TIE) foram medidas *in situ* pelo método do infiltrômetro de anel duplo usando o infiltrômetro

modelo IN2-W da Turf-TecInternational<sup>®</sup>. O equipamento de anéis concêntricos foi cravado no solo e uma lâmina de água de 10 mm foi adicionada nos anéis para o ensaio. O anel externo foi preenchido primeiro para evitar a infiltração lateral de água do anel interno, que posteriormente foi totalmente preenchido com água para realização do ensaio. O nível da coluna d'água com auxílio de uma régua milimétrica foi observado em intervalos de 1, 2, 3 e 5 minutos, escolhidos conforme a altura de água infiltrada. A cada leitura os anéis eram reabastecidos com água para uma nova observação. O teste foi conduzido até que a taxa de infiltração fosse constante em pelo menos três medições consecutivas, atingindo a taxa de infiltração estável (TIE).

Três ensaios em parcelas aleatórias foram realizados aos 2,5 anos (maio de 2017) e 3,5 anos (maio de 2018) de reabilitação. A umidade do solo na profundidade de 0 a 20 cm foi mensurada pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 2017) nos respectivos dias dos testes e avaliada pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) no programa R antes de comparar as taxas de infiltração.

A taxa de infiltração foi calculada pela relação entre a lâmina infiltrada por intervalo de tempo usando a equação:  $TI = \Delta h / \Delta t$  em que:  $TI$  é a Taxa de infiltração ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $h$  é a altura da lâmina de água infiltrada (mm), e  $t$  é o intervalo de tempo para infiltrar a lâmina de água em horas (h). A taxa de infiltração inicial (TII) foi aquela mensurada no primeiro instante do ensaio. A capacidade de infiltração (CI) foi considerada a taxa máxima que o solo pode absorver água após estabilização da infiltração em um dado intervalo de tempo. O valor da altura de lâmina de água foi transformado em CI ( $\text{mm h}^{-1}$ ) pela equação:  $CI = 60 hAc / tAc$  em que a CI é a capacidade de infiltração, em  $\text{mm h}^{-1}$ ,  $hAc$  é a altura da lâmina de água infiltrada acumulada (mm), e,  $tAc$  é o intervalo de tempo acumulado (min). A taxa de infiltração estável (TIE) foi aquela considerada constante em pelo menos três repetições consecutivas no final do teste.

As médias da TII, CI e TIE foram analisadas quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e depois submetidas à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o programa R para verificar as diferenças entre 2,5 anos e 3,5 anos da reabilitação.

#### **2.3.4.4. Resistência mecânica do solo à penetração**

A resistência mecânica do solo à penetração foi mensurada usando o penetrógrafo automatizado modelo SoloTrack PLG5300 da Falker<sup>®</sup>. A configuração do aparelho foi: pressão máxima de 6.800 kPa, haste com cone do tipo 2, velocidade de inserção de  $2,4 \text{ cm s}^{-1}$ , profundidade de medição de até 60 cm e resolução de 1 cm.

Seis observações (dois acionamentos em três parcelas aleatórias) foram realizadas para caracterizar a resistência mecânica do solo à penetração aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos (março de 2018) de reabilitação. Três amostras compostas de solo nas profundidades de 0 – 10 cm e de 10 – 20 cm foram coletadas e analisadas quanto ao teor de umidade pelo método gravimétrico para obter a umidade no momento da realização dos testes. A diferença da umidade do solo no momento das amostragens da resistência foi avaliada pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) no programa R antes de comparar a resistência mecânica.

As medições do penetrógrafo foram tabuladas e os valores médios das profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm foram calculados. Quando o penetrógrafo parou a medição por atingir a pressão máxima de 6.800 kPa antes da profundidade de 60 cm, o último valor medido foi usado para calcular a média das profundidades subsequentes. Os valores médios por profundidade foram analisados quanto à normalidade pelo teste de “Shapiro-Wilk” e então submetidos à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ) no programa R para avaliar a diferença entre os valores de resistência do substrato aos 2,5 com o de 3,5 anos da reabilitação.

O teste de Scott Knott ( $p \leq 0,05$ ) foi aplicado para agrupar os valores semelhantes de resistência mecânica das profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm do perfil do substrato em cada período de reabilitação (2,5 e 3,5 anos). Esse teste foi precedido pela análise de variância, atendendo pressuposição de normalidade (teste de “Shapiro-Wilk”).

#### **2.4. Análises estatísticas**

Teste de normalidade de “Shapiro-Wilk” e análise de variância foram realizados para avaliar as diferenças entre os dois períodos de reabilitação após mineração de bauxita.

Coeficientes de correlação lineares de Pearson ( $r^2$ ) entre o escoamento superficial e a precipitação em aberto (PA) foram calculados para verificar as influências desses parâmetros no escoamento ( $p \leq 0,05$ ) dos dois períodos.

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada no conjunto de dados dos fatores que interferem no escoamento superficial para verificar as variáveis inter-correlacionadas e resumir as informações, destacando os fatores de maior influência ou os que são mais explicativos dos dados. Os fatores usados na ACP nos dois momentos da reabilitação foram: precipitação em aberto (PA), taxa de infiltração inicial (TII), taxa de infiltração estável (TIE), capacidade de infiltração (CI), resistência mecânica do solo à penetração (RSP), densidade do

solo (Ds), densidade das partículas de solo (Dp), porosidade total (PT), macroporosidade (ma), microporosidade (mi), área de cobertura de vegetação (ACV) e capacidade de retenção hídrica da serapilheira (CRH).

Os dados foram digitalizados e manipulados no Excel e as análises foram feitas usando o programa R v.3.5 (R CORE TEAM, 2018).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Escoamento superficial e precipitação em um ano de monitoramento**

A precipitação total no ano de 2017 foi de 1.151,78 mm. Dessa, 728,31 mm foi precipitação interna e 3,34 mm foi escoamento superficial na área de reabilitada com eucalipto, ou seja, 0,17% da precipitação foi convertida em escoamento, considerando todos os eventos de chuva no período de coleta (Figura 5a).

A precipitação total do ano foi 407,82 mm abaixo da normal climatológica estimada para a região (1.559,60 mm) de 1981 a 2010 (INMET, 2018). O valor médio de escoamento entre todas as medições foi inferior ao encontrado em plantio de eucalipto em declividade de 17,6%, com 1,2% da precipitação de 1.011 mm na região do Vale do rio Doce, Minas Gerais (SILVA et al., 2011). Esse resultado também é inferior ao relatado no período chuvoso em plantio de eucalipto com mesma declividade deste estudo em área pré-mineração de bauxita na região (SILVEIRA, 2017). O escoamento superficial anual observado na área reabilitada foi inferior aos valores mensurados em áreas não mineradas, indicando que maior quantidade de água está infiltrando no solo.

A menor precipitação (1,78 mm) e ausência de escoamento superficial foram relatadas em setembro. O maior valor de escoamento superficial ocorreu em novembro (2,05 mm), correspondendo a 0,65% dos 317,37 mm de precipitação. O menor escoamento foi no período entre junho e outubro, com uma média de 0,008% da precipitação, sendo esta, convertida em escoamento. Esses meses são caracterizados também pelas menores intensidades de precipitação média mensal de 0,63 mm h<sup>-1</sup>. A intensidade de precipitação média e máxima mensal variou ao longo do ano, com os maiores valores de janeiro a maio e de outubro a dezembro (Figura 5b e Figura5c).

O maior escoamento superficial em novembro pode ser explicado pela maior quantidade e intensidade da precipitação que ocorreu naquele mês, que chegou a 41,40 mm h<sup>-1</sup> (Figura 5b). O

mês de novembro é caracterizado por chuvas intensas, onde a intensidade de precipitação excede a taxa infiltração, gerando o maior escoamento superficial do período (DOURTE et al., 2015). O menor escoamento de junho a setembro pode ser explicado pelas menores intensidades da precipitação nesse período, pois, eventos de chuva de alta intensidade requerem água atmosférica em quantidade suficiente e em períodos secos geralmente falta a quantidade de água atmosférica suficiente para precipitar (DOURTE et al., 2015).

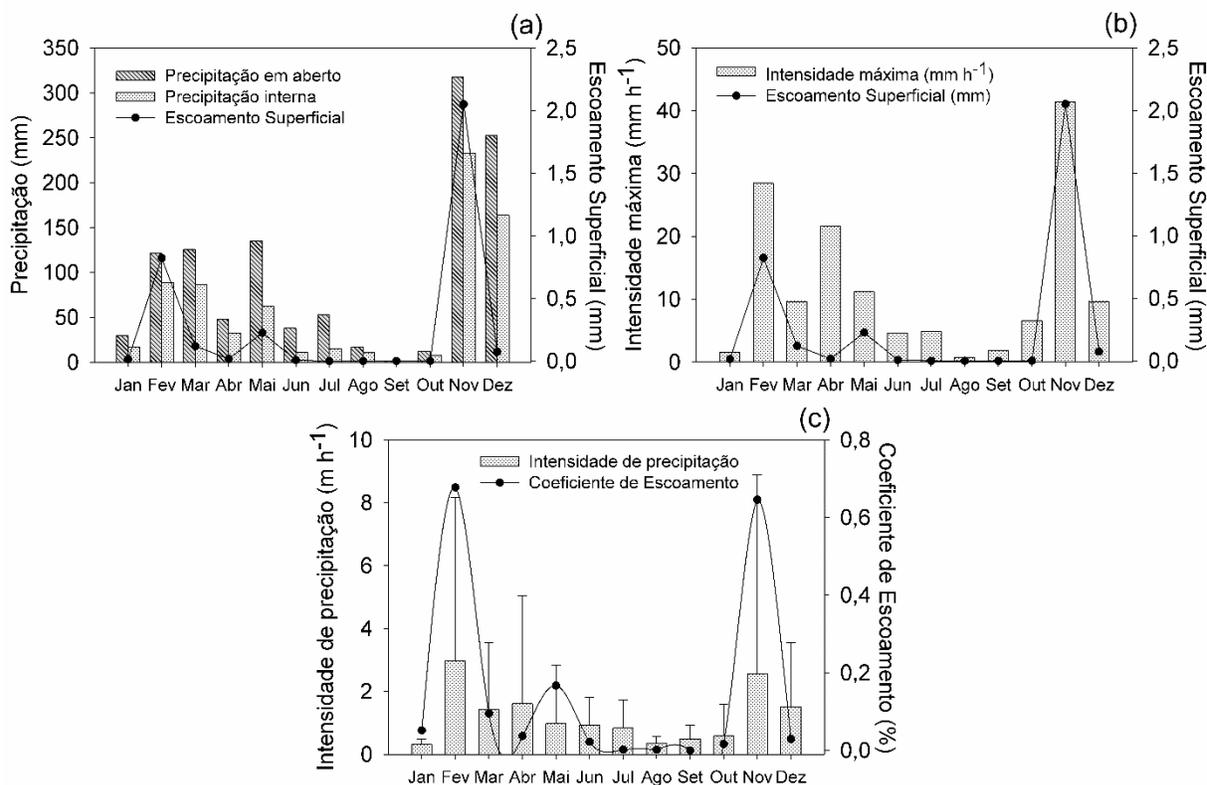


Figura 5. Precipitação e escoamento superficial mensal (janeiro a dezembro de 2017) no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil: Precipitação em aberto, precipitação interna e escoamento superficial mensal em mm (a); Intensidade de precipitação máxima mensal em mm h<sup>-1</sup> e escoamento superficial em mm (b), Intensidade de precipitação média mensal em mm h<sup>-1</sup> e coeficiente de escoamento (%) (c).

### 3.2. Precipitação e escoamento superficial aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação

O escoamento superficial no período chuvoso aos 2,5 anos de reabilitação (outubro de 2016 a maio de 2017) foi de 4,99 mm para 1.192,85 mm de precipitação. Aos 3,5 anos (outubro de 2017 a maio de 2018) o escoamento superficial foi de 2,54 mm para precipitação de 1.291,65 mm. Dezembro foi o mês com a maior precipitação (488,92 mm) e escoamento superficial (3,03 mm) aos 2,5 anos de reabilitação e janeiro apresentou os menores valores com cerca de 29,99

mm de precipitação e 0,001 mm de escoamento. Aos 3,5 anos de reabilitação o escoamento máximo (2,04 mm) foi em fevereiro, que constituiu 0,64% do somatório das chuvas desse mês (317,37mm). Por outro lado, o escoamento mínimo (0,002 mm) foi amostrado em outubro, equivalente a 0,01% das chuvas de 18,25 mm (Figura 6a e 6b).

O escoamento máximo em dezembro aos 2,5 anos e em fevereiro aos 3,5 anos pode ser explicado pelo aumento da intensidade da chuva nos respectivos meses (DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016). Em eventos de chuvas intensas a taxa de precipitação excede a taxa infiltração do solo gerando maiores escoamentos superficiais de água (DOURTE et al., 2015).

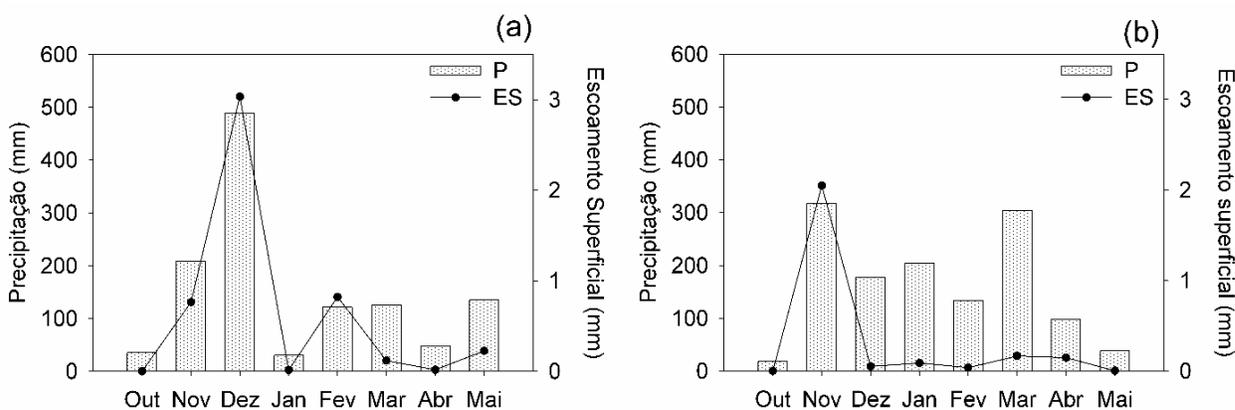


Figura 6. Precipitação (mm) e escoamento superficial mensal (mm) aos 2,5 anos de reabilitação (outubro de 2016 a maio de 2017) (a); e aos 3,5 anos de reabilitação (outubro de 2017 a maio de 2018) (b), no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil.

O escoamento superficial percentual médio de todas as coletas aos 2,5 anos foi 0,17% ( $\pm 0,37\%$ ) da precipitação e o da idade de 3,5 anos foi de 0,12% ( $\pm 0,26\%$ ). O coeficiente de escoamento mensal aos 2,5 anos foi 0,25 % ( $\pm 0,26\%$ ) da precipitação e igual ( $f = 0,63$ ;  $p$ -valor  $< 0,05$ ) ao da idade de 3,5 anos ( $0,15 \pm 0,22\%$ ) de reabilitação. Esse coeficiente variou entre os meses e apresentou maior valor em fevereiro (0,68%) e novembro (0,65%) aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação, respectivamente (Figura 7).

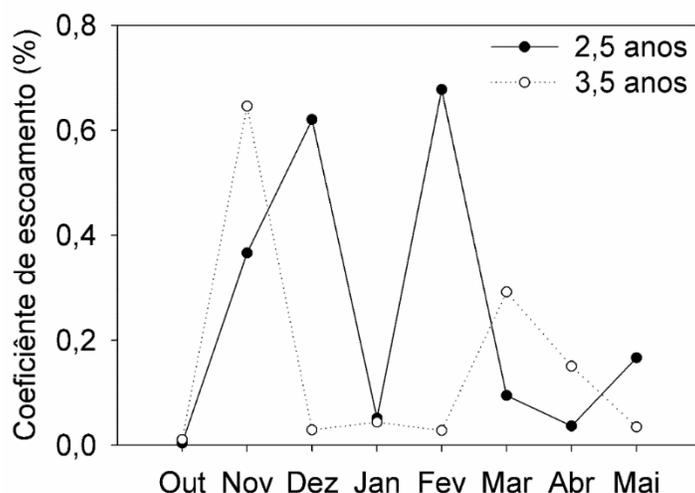


Figura 7. Coeficiente de escoamento superficial (%) aos 2,5 anos de reabilitação (outubro de 2016 a maio de 2017) e 3,5 anos de reabilitação (outubro de 2017 a maio de 2018), no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil.

A semelhança do escoamento superficial entre 2,5 e 3,5 anos de reabilitação após a mineração de bauxita pode ser explicada pelo sucesso do estabelecimento da cobertura vegetal já no primeiro período (2,5 anos) com mais de 90% das parcelas cobertas pelo dossel. A cobertura vegetal reduz o escoamento mesmo que em fases iniciais da reabilitação (LOCH, 2000; CARROLL et al., 2004). Diferenças insignificantes no escoamento superficial entre gradientes de inclinação foram observadas, após o estabelecimento da vegetação em parcelas recém mineradas em Central Queensland (CARROLL et al., 2004). O coeficiente de escoamento superficial de 0,17% aos 2,5 anos de reabilitação foi menor que o da área de plantio de eucalipto sem mineração (0,56%) na mesma faixa de declividade e na região deste estudo (SILVEIRA, 2017). O valor de 0,12% de escoamento aos 3,5 anos da reabilitação também foi inferior ao sem mineração (0,56%) em área sem mineração na região desse estudo (SILVEIRA, 2017).

O menor escoamento de ambos os períodos em relação a área não minerada demonstra que as técnicas de reabilitação têm sido aprimoradas para melhorar o funcionamento do ecossistema formado após mineração. Isso confirma que a combinação de boas condições edáficas com as características de cobertura das plantas pode facilitar as condições que levam a bons resultados hidrológicos e ecológicos para os ecossistemas reabilitados (AUDET et al., 2013).

### 3.3. Cobertura de vegetação

A área de cobertura vegetal estimada pela área de projeção das copas de eucalipto aumentou de 12.278,69 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> aos 2,5 anos de reabilitação (fevereiro de 2017) para 16.907,08 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> aos 3,5 anos da reabilitação (fevereiro de 2018), um acréscimo de 27% de cobertura das copas nas parcelas. O diâmetro médio dos fustes aumentou de 10,94 cm ( $\pm 1,60$  cm) para 12,09 cm ( $\pm 1,99$  cm) e foi equivalente a uma área basal de 15,95 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> e 19,55 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, para o 2,5 anos e 3,5 anos de reabilitação, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Área de projeção das copas (APC), diâmetro do fuste (*dap*) e área basal (AB) das árvores de eucalipto aos 2,5 (fevereiro de 2017) e aos 3,5 anos (fevereiro de 2018) de reabilitação após mineração de bauxita, no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil

Variável	Idade (anos)	
	2,5	3,5
<i>dap</i> (cm)	10,94 $\pm$ 1,6	12,08 $\pm$ 1,99
AB (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	15,95 $\pm$ 1,19	19,54 $\pm$ 1,98
APC (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	12.278,68 $\pm$ 296,76	16.907,08 $\pm$ 321,14.

O aumento da área de projeção das copas, do diâmetro e da área basal dos fustes dos eucaliptos de 2,5 para 3,5 anos da reabilitação estão associados à dinâmica de crescimento, bem como ao acúmulo de biomassa nos diferentes compartimentos das árvores. O crescimento das plantas ao longo do tempo aumenta o espaço ocupado por elas (WINK et al., 2012). Estudo anterior avaliando a evolução da cobertura vegetal em área de mineração de superfície observou aumento sucessivo da vegetação, chegando em 60,26% em cinco anos (LI et al., 2017). Os valores de diâmetro e área basal são maiores que os encontrados em plantios convencionais de eucalipto via semente na região deste estudo (SILVEIRA, 2017) e semelhante aos valores de plantios comerciais de mesma idade (WINK et al., 2012). O aumento da área de cobertura tem efeito direto na redução das perdas de água por escoamento superficial (LI et al., 2017) devido a maior interceptação das chuvas (ZOU et al., 2015; FREITAS et al., 2016) e diminuição do impacto das gotas de chuva no solo (ARMENISE et al., 2018).

### 3.4. Serapilheira

A reabilitação aos 3,5 anos de idade apresentou maior massa média (p-valor <0,05) de serapilheira acumulada (14,53  $\pm$  1,79 Mg ha<sup>-1</sup>) do que a reabilitação aos 2,5 anos (23,46  $\pm$  2,90

Mg ha<sup>-1</sup>) após mineração de bauxita (Figura 8a e 9). As maiores retenções hídricas da serapilheira acumulada foram encontradas aos 3,5 anos (2,39 ± 0,13 kg/kg) do que aos 2,5 anos (1,91 ± 0,11 kg/kg) após mineração de bauxita (Figura 8b).

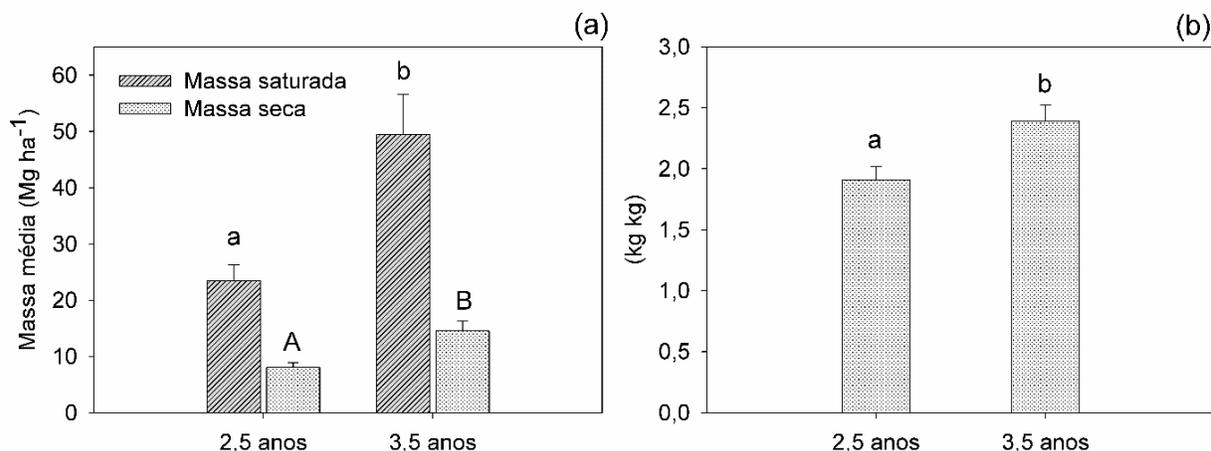


Figura 8. Massa saturada média (Mg ha<sup>-1</sup>) e massa seca média (Mg ha<sup>-1</sup>) da serapilheira acumulada (a); e capacidade de retenção hídrica (CRH) da serapilheira (kg kg<sup>-1</sup>) (b) de *Eucalyptus* aos 2,5 e 3,5 anos da reabilitação após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. Mesmas letras nas barras do mesmo parâmetro não diferem entre si pela análise de variância ( $p < 0,05$ ).

O maior estoque de serapilheira acumulada aos 3,5 anos de reabilitação pode ser explicado pelo maior porte e crescimento das árvores, que potencializa a produção e a deposição de folhas no solo (MATEUS et al., 2013; SANTOS et al., 2017). A maior capacidade de retenção hídrica da serapilheira na idade de 3,5 anos está relacionada à maior quantidade de folhas e materiais (MATEUS et al., 2013).

O menor estoque de serapilheira aos 2,5 anos de reabilitação é devido estar mais próximo da interrupção dos ciclos biogeoquímicos de nutrientes pelo revolvimento dos horizontes do solo durante a mineração (LEÓN e OSORIO, 2014), mas o aumento no aporte de serapilheira permite à reativação do ciclo de nutrientes e, assim, melhora a qualidade do solo em áreas reabilitadas (LEÓN e OSORIO, 2014). A decomposição da serapilheira acumulada na superfície do substrato melhora suas propriedades físicas, tais como: aumento da porosidade e redução da densidade (ILEK et al., 2015). A cobertura do solo pela serapilheira promove infiltração de chuva no solo e reduz a velocidade de escoamento superficial (LOCH, 2000; DONJADEE e TINGSANCHALI, 2016).



Figura 9. Serapilheira no gabarito de 0,25 m<sup>2</sup> aos 2,5 anos de reabilitação (maio de 2017) (a) e aos 3,5 anos de reabilitação (maio de 2018) (b), no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil.

### 3.5. Infiltração de água no solo

A umidade do substrato aos 2,5 anos (16,20% ± 1,33%) foi igual a de 3,5 anos (17,08% ± 1,70%) de reabilitação nos respectivos dias dos testes de infiltração. A similaridade entre as umidades é indispensável para comparar as taxas de infiltração, pois as condições iniciais de umidade do solo podem alterar o total de água infiltrada, mesmo não influenciando na taxa de infiltração estável (RUGGENTHALER et al., 2016).

A taxa de infiltração inicial, taxa de infiltração estável e capacidade de infiltração não diferiram (p-valor ≤ 0,05) entre as amostragens de 2,5 e 3,5 anos de reabilitação após a mineração de bauxita (Figura 10).

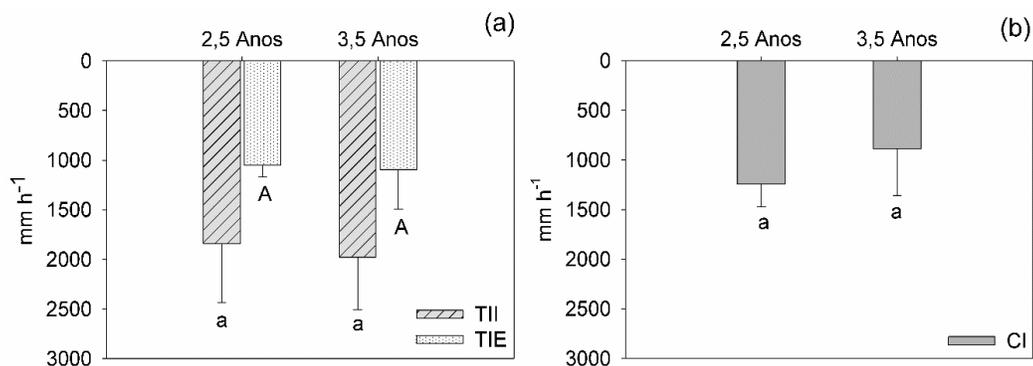


Figura 10. Taxa de Infiltração Inicial (TII) e taxa de infiltração estável (TIE) (a) e; Capacidade de infiltração (CI) (b) aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação após mineração de bauxita no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil. Barras de erro representam ± desvio padrão. Médias com mesma letra não diferem pela análise de variância (p-valor < 0,05) no mesmo parâmetro.

Os valores similares da taxa de infiltração inicial, capacidade de infiltração e taxa de infiltração estável entre os períodos são explicados pelos análogos teores de umidade, de mineralogia do substrato e do método de colocação do *topsoil* (JAROCKI, 1994). Maiores infiltrações ocorrem quando os solos estão secos e quando as condições de textura e estrutura apresentam mais espaços vazios, característica esta, que demanda longos períodos para mudanças (JAROCKI, 1994). A recuperação do solo da terra da mina é um processo complexo e lento (SHEORAN et al., 2010). Ambos os valores de infiltração são considerados elevados quando comparados a de solos naturais (SILVEIRA, 2017). Resultados de infiltração em minas superficiais recuperadas relataram elevadas taxas de infiltração aos 2,5 anos de reabilitação em relação ao solo natural (SILVEIRA, 2017) e maiores taxas de infiltração em áreas recuperadas com três e cinco anos após mineração em relação à área de pastagem natural (SANCHEZ e WOOD, 1989). A camada de *topsoil* facilita a alta taxa de infiltração após mineração (HUANG et al., 2015) que variam significativamente na área de um único campo, resultando em altos desvios padrão, mas uma comparação das taxas médias de infiltração entre áreas mineradas em diferentes períodos de reabilitação mostra uma variação muito menor (SANCHEZ e WOOD, 1989), como observado neste estudo. A elevada infiltração nos dois períodos indica que mesmo após a mineração a água está sendo retida no solo semelhante as áreas não mineradas.

Os valores de infiltração mensurados são superiores aos encontrados em plantios de eucaliptos e pastagem em latossolo (QUINTÃO et al., 2014). Essa elevada taxa de infiltração garante a recarga do sistema de lençol freático e a permanência de água no ecossistema (JAROCKI, 1994).

### **3.6. Química do solo**

Os teores disponíveis de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do substrato reduziram e a matéria orgânica (MO) aumentou dos 2,5 para os 3,5 anos de reabilitação após mineração de bauxita (Tabela 2).

A redução da disponibilidade dos nutrientes pode ser explicada pela absorção destes pelas plantas, semelhante aos registros em áreas de mineração de bauxita de 3,5 para 8,5 anos no sudoeste da Austrália (WARD, 2000) e redução gradual dos 3 aos 27 anos de reabilitação pós-mineração de bauxita com *Eucalyptus* na região florestal da Austrália Ocidental (BANNING et al., 2008). Elevadas concentrações de P em substratos em idades mais jovens foi resultado da

aplicação de fosfato na adubação de plantio. Entretanto, após 3 anos, o teor de P diminuiu (BANNING et al., 2008), devido aos latossolos serem particularmente deficientes em nutrientes e esses serem incorporados em altas proporções nas florestas de eucalipto. Então, a redução ao longo do tempo é esperada quando não se tem uma reposição por adubação. Os latossolos também apresentam lixiviação intensa de nutrientes, além da adsorção rápida de P, que uma vez adsorvido dificilmente retorna a solução do solo, ficando assim, indisponível às plantas (KER, 1997). No entanto, investigações sobre a dinâmica dos nutrientes, particularmente no caso ecossistemas minerados são necessárias (BANNING et al., 2008).

Tabela 2. Parâmetros químicos do solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos de reabilitação (março de 2018) no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil

Parâmetro	Unidade	2,5 anos	3,5 anos	2,5 anos	3,5 anos
Profundidade	cm	0-10		10-20	
pH H <sub>2</sub> O		5,02	5,41	5,35	4,94
P		2	1,7	1,9	0
K	mg/dm <sup>3</sup>	8	1	6	0
Ca <sup>2+</sup>		1,31	2,07	1,59	0,81
Mg <sup>2+</sup>		0,99	1	1,19	0,46
Al <sup>3+</sup>		0	0	0	0,09
H + Al	cmolc/dm <sup>3</sup>	7,3	5,1	5,1	6,1
SB		2,32	3,07	2,8	1,27
t		2,32	3,07	2,8	1,27
T		9,62	3,07	7,9	1,36
V	%	24,1	37,6	35,4	17,2
m		0	0	0	6,6
MO	dag/kg	3,52	3,7	3,26	3,7
P-Rem	mg/L	9,8	11,3	10,5	8,3

SB - Soma de Bases, t - Capacidade de troca catiônica efetiva, T - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0, V - Índice de saturação por bases, m - Índice de saturação por alumínio, MO - Matéria Orgânica, P-Rem - Fósforo remanescente.

O aumento de MO é explicado pela recuperação da biomassa microbiana e também, pelo aumento das concentrações de carbono orgânico, devido a incorporação pela deposição da serapilheira e raízes finas. A MO aumenta com a idade da reabilitação, podendo ficar, após 18 anos de reabilitação, similar, às áreas não mineradas (BANNING et al., 2008). A recuperação e a rotatividade de matéria orgânica do substrato e o ciclo dos nutrientes minerais são fundamentais

para o sucesso da reabilitação após grandes perturbações do ecossistema (BANNING et al., 2008).

### 3.7. Física do solo

O teor de argila do substrato foi igual aos 2,5 e 3,5 anos de reabilitação. Por outro lado, o teor de areia aumentou (p-valor  $\leq 0,05$ ) aos 3,5 anos. A densidade do solo, densidade de partícula, microporosidade e porosidade total foram iguais nas duas idades. Apenas a macroporosidade foi menor (p-valor  $\leq 0,05$ ) aos 3,5 anos de reabilitação embora uma das amostragens foi igual a idade de 2,5 anos (Tabela 3).

Tabela 3. Propriedades físicas do solo na profundidade de 0-10 cm aos 2,5 anos (março de 2017) e 3,5 anos (março de 2018) de reabilitação após mineração no município de Miraf, Minas Gerais, Brasil

Propriedade	Unidade	2,5 anos	3,5 anos
Areia Grossa	dag kg <sup>-1</sup>	13,67 ± 0,47 a	17,45 ± 1,70 b
Areia Fina		10,67 ± 0,47 a	14,15 ± 0,79 b
Silte		14,33 ± 0,94 a	8,53 ± 3,34 a
Argila		61,33 ± 0,47 a	61,27 ± 2,31 a
Densidade do Solo	kg dm <sup>-3</sup>	1,24 ± 0,06 a	1,19 ± 0,10 a
Densidade de Partícula		2,55 ± 0,12 a	2,57 ± 0,05 a
Macroporosidade	dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup>	0,36 ± 0,05 a	0,23 ± 0,01 b
Microporosidade		0,28 ± 0,04 a	0,34 ± 0,02 a
Porosidade Total		0,52 ± 0,02 a	0,54 ± 0,04 a.

A diferença de macroporosidade e areia pode ser devido ao solo reconstruído não apresentar uma estrutura homogênea em toda a área (LI et al., 2014) e as amostragens foram aleatórias. A similaridade das demais características físicas do solo podem ser explicadas pelo curto período entre as amostragens (NGUGI et al., 2017). A semelhança na porosidade total e os demais parâmetros físicos do substrato, mesmo com a redução da macroporosidade, pode ter garantido a semelhança do escoamento superficial entre os períodos avaliados. As consequências da perturbação física no solo durante a decapagem, estocagem, e a reconformação topográfica causam transformações nessas propriedades em relação as áreas de referência do entorno (LI et al., 2014). Períodos curtos não são suficientes para detectar mudanças nos parâmetros físicos do solo, um mecanismo de monitoramento de longo prazo deve ser estabelecido para observar a

melhoria do solo em áreas pós mineração, como intervalos de 5 anos, 10 anos, 15 anos ou mais (CHEN et al., 2011). A similaridade da densidade de partícula entre as idades indica que a composição química e mineralógica do substrato não foi alterada (BARROS et al, 2013). Estudos anteriores mencionam que os solos reconstruídos não recuperam as características físicas de pré-mineração até 23 anos, e alguns autores sugerem o aumento do tempo de responsabilidade das empresas pela recuperação e arrendamento das minas (SEITZ et al., 1981; NGUGI et al., 2017).

As poucas diferenças das características físicas observadas confirmam que os processos de formação de solo requer períodos de tempo mais longos do que o tempo estabelecido para a responsabilidade legal da empresa pela recuperação da área (em média 5 anos após o estabelecimento bem-sucedido de vegetação). Períodos relativamente longos (50 anos ou mais) dos processos naturais de formação do solo são necessários para recuperar a estrutura dos solos das terras mineradas (SEITZ et al., 1981). Estudo em área de mineração de superfície relatou que a inoculação de minhocas no substrato melhorou a porosidade do solo após 21 anos da mineração (MARASHI e SCULLION, 2004). Essa técnica poderia ser implementada em áreas reabilitadas visando acelerar o reestabelecimento da estrutura do solo minerado.

### **3.8. Resistencia mecânica do solo à penetração**

A umidade do solo no momento do teste de resistência do solo à penetração na idade de 2,5 anos ( $19,60 \pm 0,063\%$ ) foi igual ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ) a idade de 3,5 anos ( $21,59 \pm 0,47\%$ ) de reabilitação. Os valores similares da umidade são fundamentais para padronizar seu efeito nos valores de resistência do solo à penetração (SINNETT et al., 2006). Aumento na umidade provoca uma diminuição na resistência do solo e umidade diferente entre as amostragens pode gerar erros na comparação dos resultados (PEZOWICZ e CHOMA-MORYL, 2015). Então, os valores similares permitiram comparar os resultados de resistência mecânica do solo à penetração.

As seis amostragens de ambas as idades atingiram a resistência máxima do equipamento (6.800 kPa), mas na idade de 3,5 anos o equipamento atingiu essa resistência em maiores profundidades do que aos 2,5 anos de reabilitação (Figura 11).

As amostragens atingiram a resistência máxima do equipamento nos dois períodos devido à presença de concreções de saprolito remanescentes após a mineração (SILVEIRA, 2017). Esse aumento é explicado pelo maior índice de pedregosidade a partir de 20 cm de profundidade,

devido às mudanças no solo pela reestruturação de seus horizontes no processo de mineração (BARROS et al., 2013).

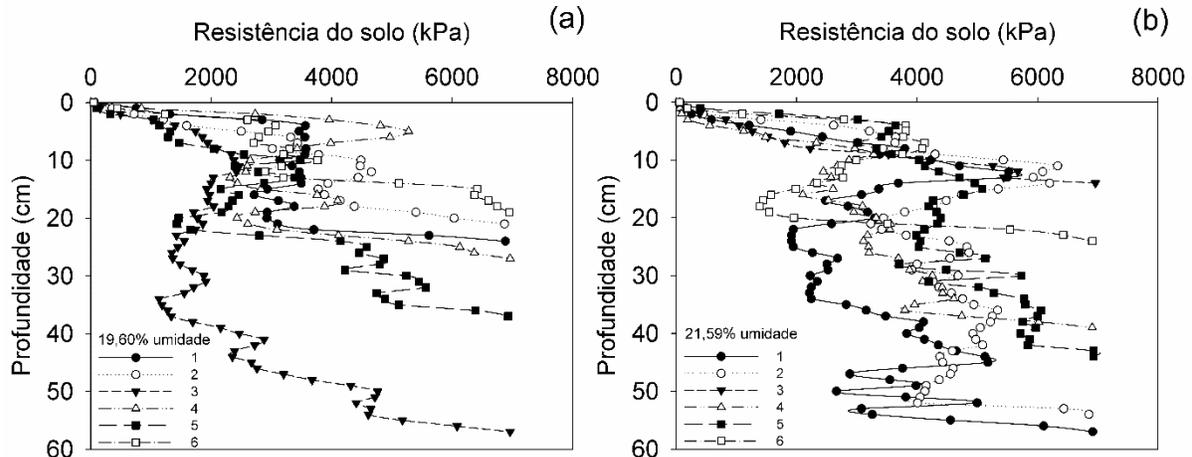


Figura 11. Resistência mecânica do solo à penetração das seis amostragens aos 2,5 anos de reabilitação em março de 2017 (a) e aos 3,5 anos de reabilitação em março de 2018 (b), no município de Miraí, Minas Gerais, Brasil.

A resistência média do substrato de 0-60 cm de profundidade foram iguais ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ) entre as idades de 2,5 (4900,02 kPa) e 3,5 anos (4756,87 kPa) de reabilitação. A resistência média em cada profundidade da idade de 2,5 anos foi similar à de 3,5 anos para todas as profundidades (Figura 12). As menores resistências foram nas profundidades de 10 e 20 cm, sendo que 30, 40, 50 e 60 cm foram as mais resistentes (Figura 13a e 13b).

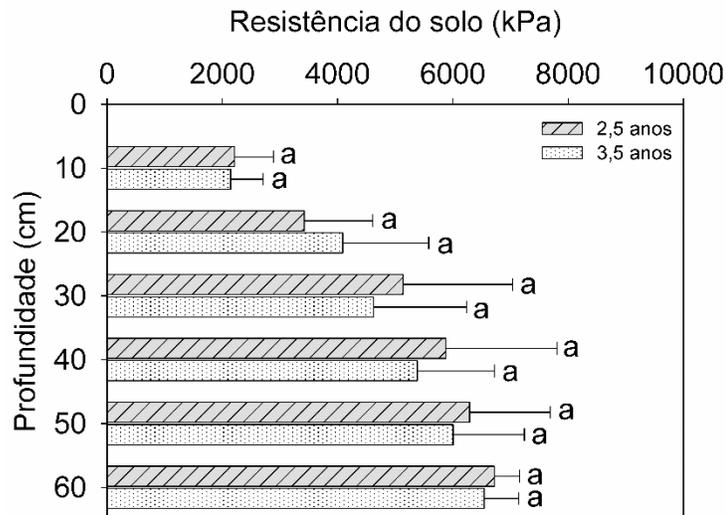


Figura 12. Resistência à penetração do substrato aos 2,5 anos e 3,5 anos de reabilitação para cada profundidade. Barra com mesma letra indica que os tratamentos não diferem pela análise de variância ( $p\text{-valor} < 0,05$ ).

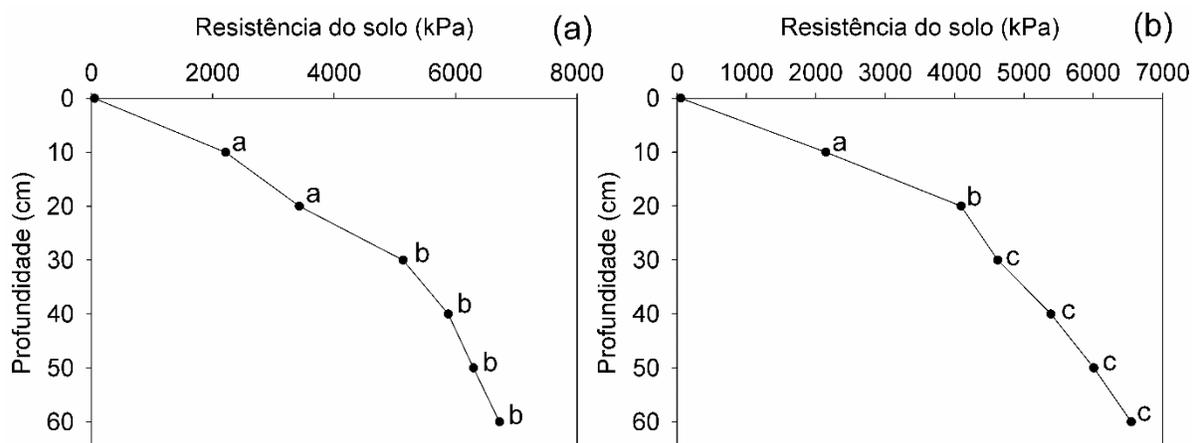


Figura 13. Resistência do solo à penetração entre as profundidades ao longo do perfil de 60 cm: a) diferença entre as profundidades aos 2,5 anos de reabilitação; e b) diferença entre as profundidades aos 3,5 anos de reabilitação. As letras referem-se aos agrupamentos de resistência entre as profundidades no mesmo tratamento pelo teste de Scott Knott (p-valor <0,05).

Os valores similares de resistência são explicados pela igualdade estrutural do solo nas duas amostragens, estrutura esta que demanda muitos anos para alterações (NGUGI et al., 2017). As menores resistências até 20 cm de profundidade são explicadas pela reposição da camada de solo superficial orgânico (*topsoil*). Essa camada pode levar a uma recuperação de mineração bem-sucedida, pois, o solo reconstruído terá características similares ao original (MARTIN-MORENO et al., 2016). O aumento de resistência a partir de 30 cm de profundidade é devido à quantidade expressiva de cascalho de saprolito abaixo do *topsoil*, como observado em área após a mineração de bauxita da região (SILVEIRA, 2017). O saprolito apresenta grande resistência mecânica à penetração e não forma estrutura como o solo, pois o rearranjo de suas partículas obstrui os poros (SILVEIRA, 2017). Os cascalhos remanescentes da mineração devem ser evitados visando reduzir a resistência mecânica do solo à penetração em áreas reabilitadas.

A resistência obtida por penetrômetros é uma indicação quantitativa da resistência à penetração experimentada pelas raízes em solos (BENGOUGH e MULLINS, 1991). O limite de restrição ao crescimento de raiz é de 2 MPa (2000 kPa), e os valores de resistência à penetração mensurados nos dois períodos sugerem que o enraizamento seria restrito em profundidades relativamente rasas (SINNETT et al., 2008). Entretanto, nessa área foi observado o crescimento de raízes de eucalipto em profundidades maiores de 60 cm mesmo excedendo esse valor de resistência em todas as medições (SILVEIRA, 2017). O crescimento das raízes de eucalipto em

maiores profundidades que a resistência máxima demonstrou que esta pode ser pontual devido à presença de cascalho de saprolito.

A maior resistência mecânica do solo a penetração medida em profundidades de 30 a 60 cm nos dois períodos permitiu inferir sobre a presença de camadas compactadas, que não interferem na infiltração de Latossolo Vermelho distrófico típico devido a sua estrutura granular que facilita a infiltração e não apresentam valores críticos de escoamento (MARTINS et al, 2002; CÂNDIDO et al., 2014).

### 3.9. Coeficientes de correlação e análise de componentes principais

Os coeficientes de correlação linear ( $r^2$ ) mostraram correlação positiva do escoamento superficial com a precipitação. Os valores foram 0,96 (p-valor 0,001) aos 2,5 anos e 0,61 (p-valor 0,105) aos 3,5 anos (Figura 14a e 14b), indicando redução da correlação com a idade da reabilitação.

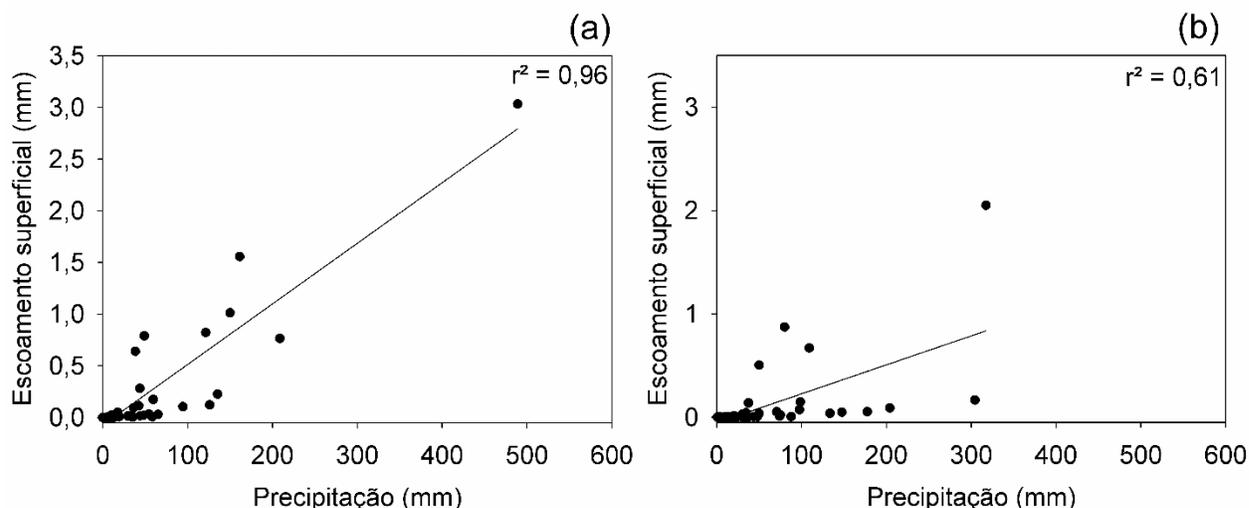


Figura 14. Coeficientes de correlação de Pearson ( $r^2$ ) entre o escoamento superficial e a precipitação aos 2,5 anos (a) e 3,5 anos de reabilitação (b) após mineração de bauxita no município de Miral, Minas Gerais, Brasil.

O menor coeficiente de correlação entre o escoamento superficial e a precipitação aos 3,5 anos pode estar relacionado ao aumento da área de cobertura vegetal que contribui na redução das perdas de água por escoamento superficial (ZHANG et al., 2014) devido a maior interceptação das chuvas (ZOU et al., 2015; FREITAS et al., 2016) e diminuição da energia do impacto das gotas de chuva no solo (ARMENISE et al., 2018).

A análise de componentes principais dos fatores que interferiram no escoamento superficial aos 2,5 anos de idade após mineração de bauxita, explicou 69,10% da variabilidade total nas duas primeiras componentes, onde 44,70% da variância estão explicados pela Componente 1. A precipitação, taxa e capacidade de infiltração, macro e microporosidade foram os fatores mais explicativos no Componente 1. No Componente 2 (24,4%) a densidade do solo e a cobertura vegetal tiveram os maiores autovetores (Figura 15).

Os maiores autovetores para taxa e capacidade de infiltração, macro e microporosidade e densidade do solo permitiu inferir que as características do solo foram bastante explicativas na PCA e podem ser utilizadas para explicar os valores similares de escoamento superficial, pois são fatores que variam bastante em ambientes reabilitados e podem influenciar nas partições de água perdidas por escoamento superficial (SANTOS et al., 2018).

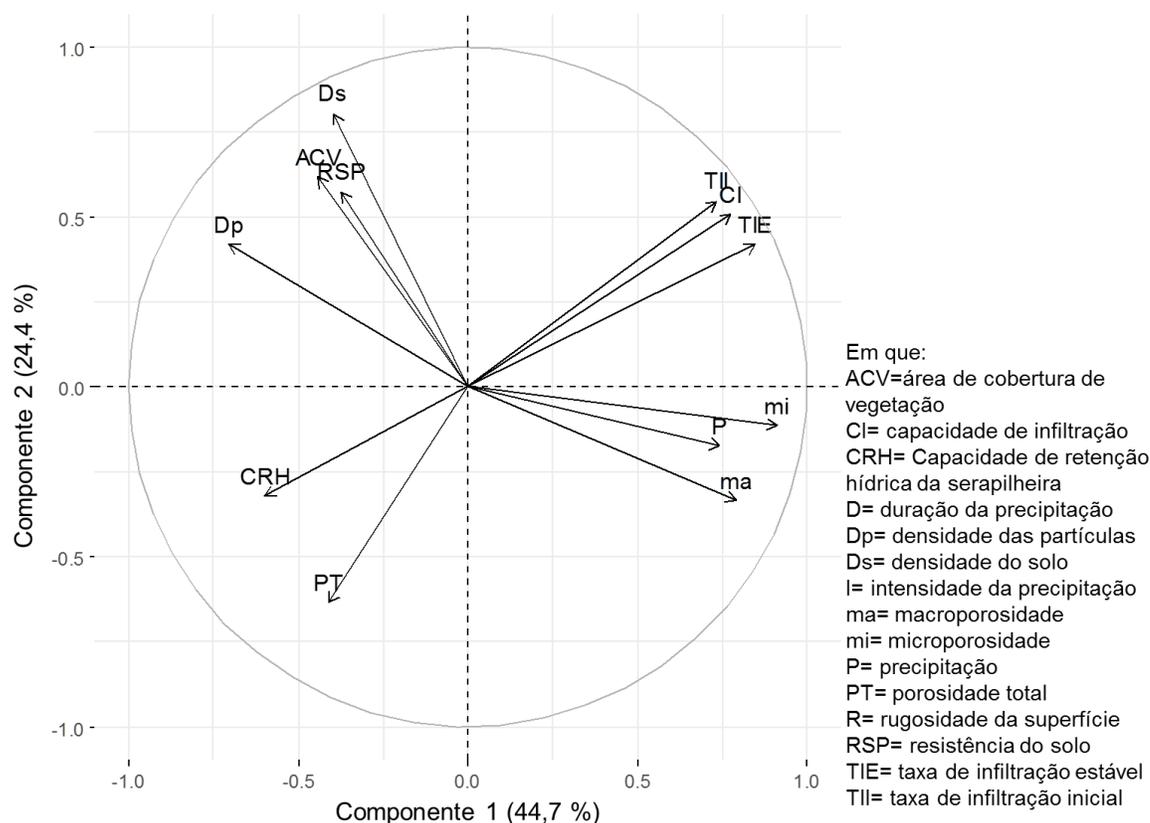


Figura 15. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na idade de 2,5 anos após mineração de bauxita no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil.

A análise de componentes principais dos fatores que interferem no escoamento superficial aos 3,5 anos de reabilitação, explicou 75,90% da variabilidade total nas duas primeiras componentes, sendo que 39,40% da variância estão explicados pelo Componente 1 e 36,50% pelo Componente 2. Nos 39,40% de explicação do Componente 1, a precipitação, a cobertura de vegetação, densidade do solo e porosidade total, macro e micro porosidade são as variáveis mais explicativas. No Componente 2 as taxas e capacidade de infiltração são as mais explicativas (Figura 16).

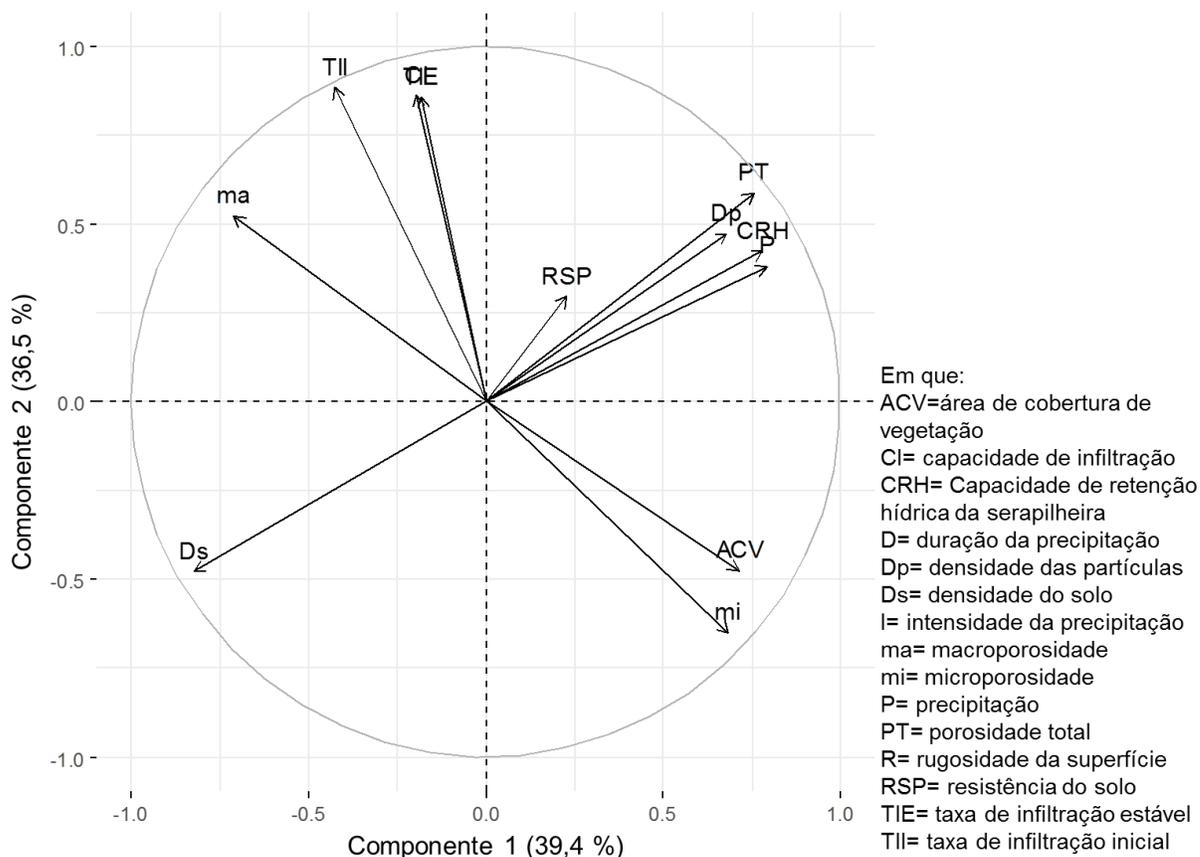


Figura 16. Componentes principais para os fatores físicos ambientais e antrópicos que interferem no escoamento superficial na idade de 3,5 anos após mineração de bauxita no município de Mirai, Minas Gerais, Brasil.

A cobertura de vegetação entre os fatores com maior autovetor na ACP pode ser utilizada para explicar a semelhança entre os coeficientes de escoamento superficial dos períodos, devido a sua eficiência na redução do escoamento superficial pela interceptação. Além disso, a cobertura do solo pela presença de serapilheira favorece o aumento nos teores de matéria orgânica, e

redução da densidade do solo e, conseqüentemente, o escoamento superficial de água tende a reduzir (VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2010).

#### **4. CONCLUSÃO**

O escoamento superficial na área reabilitada após dois anos da mineração de bauxita apresentou o mesmo padrão de áreas não mineradas, com maiores valores nos meses mais chuvosos (novembro, dezembro e fevereiro).

O escoamento superficial não foi diferente entre 2,5 e 3,5 anos de reabilitação, após mineração de bauxita, e diminuiu em relação ao escoamento pré-mineração.

As características físicas e químicas do solo apresentaram poucas alterações entre as duas amostragens, mas a matéria orgânica, a serapilheira e sua capacidade de retenção hídrica aumentaram.

A cobertura vegetal e características do solo foram os fatores determinantes para a similaridade de escoamento superficial nos dois períodos.

A combinação do manejo adequado do solo e a rápida cobertura das plantas melhoram os resultados hidrológicos para os ecossistemas reabilitados, proporcionando baixos valores de escoamento em relação à área pré-mineração.

## **CONCLUSÃO GERAL**

O escoamento superficial foi menor na reabilitação inicial em relação à área de referência e foi semelhante entre 2,5 e 3,5 anos de reabilitação, permanecendo inferior ao da área de referência.

A topografia e as condições de solo e cobertura vegetal permitiram o ambiente reabilitado reduzir o escoamento superficial, mantendo os processos hidrológicos.

A combinação do bom manejo associado à rápida cobertura das plantas pode facilitar os bons resultados hidrológicos e ecológicos para os ecossistemas reabilitados, após mineração de bauxita.

Essas informações serão úteis para a gestão dessas áreas, além de subsidiar a formulação de políticas e metodologias que mantenham as condições hidrológicas apropriadas e perpetuem ecossistemas sustentáveis e serviços ecossistêmicos em áreas reabilitadas.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de águas - ANA. Portal HidroWeb. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>> Acesso em: 12 de jun. de 2018.

AHIRWAL, J.; MAITI, S. K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India. **Catena**, v. 140, n. 1, p. 155-163, 2016.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARMENISE, E.; SIMMONS, R. W.; AHN, S.; GARBOUT, A.; DOERR, S. H.; MOONEY, S. J.; STURROCK, C. J.; RITZ, K. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. **Journal of hydrology**, v. 556, n. 1, p. 211-219, 2018.

ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E.; FONSECA, R. S.; SOLAR, R. R.; FERNANDES-FILHO, E. I. Vegetation cover of Brazil in the last 21 ka: New insights into the Amazonian refugia and Pleistocenic arc hypotheses. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 1, p. 47-56, 2018.

Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. **Relatório da Bauxita: Bauxita no Brasil Mineração Responsável e Competitividade**. 2017. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf)> Acesso em: 29 de jan. de 2018.

ATANACKOVIĆ, N.; DRAGIŠIĆ, V.; STOJKOVIĆ, J.; PAPIĆ, P.; ZIVANOVIĆ, V. Hydrochemical characteristics of mine waters from abandoned mining sites in Serbia and their impact on surface water quality. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 11, p. 7615-7626, 2013.

AUDET, P.; GRAVINA, A.; GLENN, V.; MCKENNA, P.; VICKERS, H.; GILLESPIE, M.; MULLIGAN, D. Structural development of vegetation on rehabilitated North Stradbroke Island: Above/belowground feedback may facilitate alternative ecological outcomes. **Ecological Processes**, v. 2, n. 1, p. 20, 2013.

BANNING, N. C.; GRANT, C. D.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 8, p. 2021-2031, 2008.

BARROS, D. A. D.; GUIMARÃES, J. C. C.; PEREIRA, J. A. A.; BORGES, L. A. C.; SILVA, R. A.; PEREIRA, A. A. S. Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts. **Revista Escola de Minas**, v.65, n.1, p.127-133, 2012.

BARROS, D. A. D.; PEREIRA, J. A. A.; FERREIRA, M. M.; SILVA, B. M.; FERREIRA FILHO, D.; NASCIMENTO, G. D. O. Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 5, p. 419-426, 2013.

BENDFELDT, E. S.; BURGER, J. A.; DANIELS, W. L. Quality of amended mine soils after sixteen years. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1736-1744, 2001.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil**, v. 131, n. 1, p. 59-66, 1991.

BORGES, S. R. **Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e cafeeiro pós-mineração de bauxita**. 111f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2013.

BRAMORSKI, J.; MARIA, I. C.; CRESTANA, S. Relations between soil surface roughness, tortuosity, tillage treatments, rainfall intensity and soil and water losses from a red yellow latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1291-1298, 2012.

BRASIL. **Setor mineral representa 4% do PIB brasileiro**. 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/setor-mineral-representa-4-por-cento-do-pib-brasileiro>> Acesso em: 29 de jan. 2018.

CÂNDIDO, B. M.; NAVES SILVA, M. L.; CURI, N.; VELLOSO, P. G. B. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p.1565-1575, 2014.

CARROLL, C.; MERTON, L.; BURGER, P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. **Soil Research**, v. 38, n. 2, p. 313-328, 2000.

CARROLL, C.; PINK, L.; BURGER, P. Coalmine rehabilitation: A long term erosion and water quality study on Central Queensland coalmines. In: **Conserving soil and water for society: sharing solutions ISCO**, p. 1-6, 2004.

CHAER, G. M.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; DE FARIA, S. M.; BODDEY, R. M. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, v. 31, n. 2, p. 139-149, 2011.

CHEN, Y.; LI, D.; LI, D.; WU, X.; ZHENG, Y. Assessment for soil improvement benefit of land rehabilitation in dump areas. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 3-4, p. 1204-1212, 2011.

CLARK, E.V.; ZIPPER, C.E. Vegetation influences near-surface hydrological characteristics on a surface coal mine in eastern USA. **Catena**, v. 139, n. 4, p. 241-249, 2016.

CUI, J.; LIU, C.; LI, Z.; WANG, L.; CHEN, X.; YE, Z.; FANG, C. Long-term changes in topsoil chemical properties under centuries of cultivation after reclamation of coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China. **Soil and Tillage Research**, v. 123, n. 7, p. 50-60, 2012.

DARMODY, R. G.; DANIELS, W. L.; MARLIN, J. C.; CREMEENS, D. L. Topsoil: What is it and who cares? In: **National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Billings, MT. Revitalizing the environment: Proven solutions and innovative approaches**. ASMR, Lexington, KY. 2009. p. 237-269.

DONJADEE, S.; TINGSANCHALI, T. Soil and water conservation on steep slopes by mulching using rice straw and vetiver grass clippings. **Agriculture and Natural Resources**, v. 50, n. 1, p. 75-79, 2016.

DOURTE, D. R.; FRAISSE, C. W.; BARTELS, W. L. Exploring changes in rainfall intensity and seasonal variability in the Southeastern US: Stakeholder engagement, observations, and adaptation. **Climate Risk Management**, v. 7, n. 1, p. 11-19, 2015.

DURIGAN, G. Métodos para análise de vegetação arbórea. In: CULLEN JR. L.; RUDRAN, R.; VALLADARES-PADUA C. (Orgs.). **Métodos de estudos em biologia da conservação e manejo da vida silvestre**. Editora da UFPR, Curitiba, 2003, p.455-479.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

EVANS, D. M.; ZIPPER, C. E.; HESTER, E. T.; SCHOENHOLTZ, S. H. Hydrologic effects of surface coal mining in Appalachia (US). **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 5, p. 1436-1452, 2015.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n. 1, p.6-16, 1998.

FANG, H.; SUN, L.; TANG, Z. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 11, p. 2649-2658, 2015.

FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C.; MOURA, T. P. A.; MENEZES, A. R.; SANTANA, C. I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1457-1465, 2016.

FREITAS, J. P. O.; DIAS, H. C. T.; SILVA, E.; TONELLO, K. C. Net precipitation in a semideciduous forest fragment in Viçosa city, MG. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 793-801, 2016.

GANJEGUNTE, G. K.; WICK, A. F.; STAHL, P. D.; VANCE, G. F. Accumulation and composition of total organic carbon in reclaimed coal mine lands. **Land Degradation & Development**, v. 20, n. 2, p. 156-175, 2009.

HAIGH, M. J.; SANSOM, B. Soil compaction, runoff and erosion on reclaimed coal-lands (UK). **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 4, p. 135-146, 1999.

HAIR, J.F., HULT, G.T.M., RINGLE, C.M., SARSTEDT, M. **A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)**. Sage Publications, 2016. 390 p.

HAKAMADA, R.; HUBBARD, R. M.; FERRAZ, S., STAPE, J. L.; LEMOS, C. Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal Eucalyptus genotypes. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 251-257, 2017.

HOOMEHR, S.; SCHWARTZ, J. S.; YODER, D. C.; DRUMM, E. C.; WRIGHT, W. Curve numbers for low-compaction steep-sloped reclaimed mine lands in the southern Appalachians. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1627-1638, 2013.

HUANG, L.; ZHANG, P.; HU, Y., ZHAO, Y. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine. **Global Ecology and Conservation**, v. 4, p. 255-263, 2015.

HUMPHREYS, M. W.; WHALLEY, W. R.; TURNER, L.; BINLEY, A.; WATTS, C. W.; SKØT, L.; JOYNES, A.; HAWKINS, S.; KING, I. P.; O'DONOVAN, S.; HAYGARTH, P. M. A novel grass hybrid to reduce flood generation in temperate regions. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1683, p. 1683, 2013.

ILEK, A.; KUCZA, J.; SZOSTEK, M. The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils. **European Journal of Forest Research**, v. 134, n. 1, p. 187-197, 2015.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em 18 de junho de 2018.

JAROCKI, K. E. **Properties of and factors influencing infiltration rates at a reclaimed lignite mine, Freestone County, Texas**. 158 f. Thesis (Master of Arts), Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, Austin, 1994.

JESUS, G. L.; SILVA, I. R.; ALMEIDA, L. F. J.; SANTOS, M. A.; LEITE, F. P.; NEVES, J. C. L. Produtividade do eucalipto, atributos Físicos do solo e Frações da Matéria orgânica influenciadas Pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p.1190-1203, 2015.

JUWARKAR, A. A.; MEHROTRAA, K. L.; NAIR, R.; WANJARI, T.; SINGH, S. K.; CHAKRABARTI, T. Carbon sequestration in reclaimed manganese mine land at Gumgaon, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 160, n. 1-4, p. 457-464, 2010.

KAMIMURA, K. M.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo em uma lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p.1457-1465, 2012.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Revista Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

KUO, Y. M.; MUÑOZ-CARPENA, R. Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filter strips to control runoff pollution from phosphate mining areas. **Journal of Hydrology**, v. 378, n. 3-4, p. 343-354, 2009.

LANGHANS, C.; GOVERS, G.; DIELS, J.; CLYMANS, W.; VAN DEN PUTTE, A. Dependence of effective hydraulic conductivity on rainfall intensity: loamy agricultural soils. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 16, p. 2257-2268, 2010.

LEÓN, J. D.; OSORIO, N. W. Role of Litter Turnover in Soil Quality in Tropical Degraded Lands of Colombia. **The Scientific World Journal**, 2014:693981. doi:10.1155/2014/693981.

LI, H.; LEI, J.; WU, J. Evolution Analysis of Vegetation Cover under the Disturbance of Rare Earth Mining: a Case in Lingbei Mining Area. **Journal of Applied Science and Engineering**, v. 20, n. 3, p. 393-400, 2017.

LI, Y.; WEN, H.; CHEN, L.; YIN, T. Succession of bacterial community structure and diversity in soil along a chronosequence of reclamation and re-vegetation on coal mine spoils in China. **PloS One**, v. 9, n. 12, p. e115024, 2014.

LIMA, M. T.; RIBEIRO, A. Í.; DIAS, H. C. T.; ROSA, A. G.; PIRES, G. T.; TONELLO, K. C. The dynamics of the substrate recovery of waste dumps in calcary mining under natural regeneration. **CERNE**, v. 24, n. 1, p. 18-26, 2018.

LIU, X.; BAI, Z.; ZHOU, W.; CAO, Y.; ZHANG, G. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. **Ecological Engineering**, v. 98, n.1, p. 228-239, 2017.

LOCH, R. J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland. **Soil Research**, v. 38, n. 2, p. 299-312, 2000.

LOPES, L. M.; CARVALHO, A. Gênese da bauxita de Mirai, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 4, p. 462-469, 1990.

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; TONELLO, K. C. Escoamento da água da chuva pelo tronco das árvores em uma floresta estacional semidecidual. **Revista Árvore**, v. 39, n. 3, p. 423-430, 2015.

MANNA, A.; MAITI, R. Alteration of Surface Water Hydrology by Opencast Mining in the Raniganj Coalfield Area. **Mine Water and the Environment**, v. 35, n. 2, p. 156-167, 2016.

MARASHI, A. R. A.; SCULLION, J. Porosity and hydrological changes in surface mine soils. In: **Proceedings ISCO 2004 Conference. "Conserving Soil and Water for Society"**. Brisbane, Australia. 2004.

MARTIN-MORENO, C.; DUQUE, J. F. M.; IBARRA, J. M. N.; RODRIGUEZ, N. H.; SANTOS, M. A. S.; CASTILLO, L. S. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain). **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 2, p. 145-159, 2016.

MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **CERNE**, v.8, n. 1, p.32-41, 2002.

MATEUS, F. A.; MIRANDA, C. C.; VALCARCEL, R.; FIGUEIREDO, P. H. A. Estoque e capacidade de retenção hídrica da serrapilheira acumulada na restauração florestal de áreas perturbadas na Mata Atlântica. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 336-343, 2013.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **CERNE**, v. 12, n. 3, p. 211-220, 2006.

MOHAMADI, M. A.; KAVIAN, A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, n. 4, p. 273-281, 2015.

NGUGI, M. R.; DENNIS, P. G.; NELDNER, V. J.; DOLEY, D.; FECHNER, N.; MCELNEA, A. Open-cut mining impacts on soil abiotic and bacterial community properties as shown by restoration chronosequence. **Restoration Ecology**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2017.

NICOLAU, J.-M. Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. **Land Degradation & Development**, v. 14, n. 2, p. 215-226, 2003.

NIGAM, G. K.; SAHU, R. K.; SINHA, M. K.; DENG, X.; SINGH, R. B.; KUMAR, P. Field assessment of surface runoff, sediment yield and soil erosion in the opencast mines in Chirimiri area, Chhattisgarh, India. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 101, n. 1, p. 137-148, 2017.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S. D.; RODRIGUES, D. B. B. Effect of Soil Tillage and Plant Residue on Surface Roughness of an Oxisol Under Simulated Rain. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 268-278, 2015.

PEZOWICZ, P.; CHOMA-MORYL, K. Moisture content impact on mechanical properties of selected cohesive soils from the Wielkopolskie Voivodeship southern part. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 37, n. 4, p. 37-46, 2015.

PIRES, L. S.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LEITE, F. P.; BRITO, L. F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 687-695, 2006.

QUINTÃO, A. A.; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y.R.; CHAVES, W. M. S.; PALHA, F. L. Modeling of water infiltration in soil cultivated with eucalyptus and pasture. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 1, p. 148-153, 2014.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2018.

RAJURKAR, M. P.; KOTHYARI, U. C.; CHAUBE, U. C. Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. **Journal of Hydrology**, v. 285, n. 1-4, p. 96-113, 2004.

REYNOLDS, B.; REDDY, K. J. Infiltration rates in reclaimed surface coal mines. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 9, p. 5941-5958, 2012.

RUBIO, R. F.; LAZARIM, H.; LORCA, D.; RIBEIRO, V. V. Surface water control in the bauxite mines of Porto Trombetas (Para, Brazil). **Reliable Mine Water Technology:IMWA**, v. 1, n. 1, p. 837-842, 2013.

RUGGENTHALER, R.; MEIßL, G.; GEITNER, C.; LEITINGER, G.; ENDSTRASSER, N.; SCHÖBERL, F. Investigating the impact of initial soil moisture conditions on total infiltration by using an adapted double-ring infiltrometer. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 7, p. 1263-1279, 2016.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 398p.

SANCHEZ, C. E.; WOOD, M. K. Infiltration rates and erosion associated with reclaimed coal mine spoils in West Central New Mexico. **Landscape and Urban Planning**, v. 17, n. 2, p. 151-168, 1989.

SANTOS, A. F. A.; CARNEIRO, A. C. P.; MARTINEZ, D. T.; CALDEIRA, S. F. Eucalyptus litter capacity of stock and water retention. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20150303 2017.

SANTOS, K. F.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; WERNER, R. S.; WOLSCHICK, N. H.; MOTA, J. M. Study of soil physical properties and water infiltration rates in different types of land use. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 87-98, 2018.

SEITZ, W. D.; ANDERSON, C.; BENNETT, J. W.; BROMLEY, D. W.; CARTER, R. P.; CLAWSON, M.; CURRY, M. R.; GRANDT, A. F.; GROGAN, S.; HOSSNER, L. R.; KLIMSTRA, W.D.; MCKELL, C.; MOLDENHAUER, W.C.; RANDALL, A.; WILDUNG, R. E. **Surface Mining: Soil, Coal, and Society: a Report**. National Academies, 1981. v. 3140. 233 p.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A. S.; POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, v. 3, n. 2, p. 1-20, 2010.

SHRESTHA, G.; STAHL, P. D.; INGRAM, L. Influence of reclamation management practices on soil bulk density and infiltration rates on surface coal mine lands in Wyoming. In: **National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation**. Lexington, KY: ASMR, 2005. p. 1042-1056.

SHRESTHA, R. K.; LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, v. 161, n. 3-4, p. 168-176, 2011.

SILVA, L. C.; CORRÊA, R. S. Evolução da qualidade do substrato de uma área minerada no cerrado revegetada com *Stylosanthes* spp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 8, p.835-841 2010.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; PALHA LEITE, F. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 765-776 , 2011.

SILVEIRA, L. J. **Escoamento superficial em áreas de mineração de bauxita pré e pós lavra, na Zona da Mata Mineira**. 77 f. Dissertação (mestrado em Ciência Florestal), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

SINNETT, D.; POOLE, J.; HUTCHINGS, T. R. A comparison of cultivation techniques for successful tree establishment on compacted soil. **Forestry**, v. 81, n. 5, p. 663-679, 2008.

SINNETT, D.; POOLE, J.; HUTCHINGS, T. R. The efficacy of three techniques to alleviate soil compaction at a restored sand and gravel quarry. **Soil Use and Management**, v. 22, n. 4, p. 362-371, 2006.

THOMAS, C.; SEXSTONE, A.; SKOUSEN, J. Soil biochemical properties in brown and gray mine soils with and without hydroseeding. **Soil**, v. 1, n. 2, p. 621–629, 2015.

VÁSQUEZ-MÉNDEZ, R.; VENTURA-RAMOS, E.; OLESCHKO, K.; HERNÁNDEZ-SANDOVAL, L.; PARROT, J. F.; NEARING, M. A. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. **Catena**, v. 80, n. 3, p. 162-169, 2010.

VILAS BOAS, H. F.; ALMEIDA, L. F.; TEIXEIRA, R. S.; SOUZA, I. F.; SILVA, I. R. Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 6, p. 1565-1573, 2018.

VINOGRADOV, Y.B. Surface Water Runoff. In: **Hydrological Cycle**, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), v. 3, 2006. 10p. Disponível em <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c07/e2-02-06.pdf>> Acesso em 28 de jun. de 2018.

WARD, S. C. Soil development on rehabilitated bauxite mines in south-west Australia. **Soil Research**, v. 38, n. 2, p. 453-464, 2000.

WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades, **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 057-067, 2012.

ZHANG, G.; LIU, G.; ZHANG, P.; YI, L. Influence of vegetation parameters on runoff and sediment characteristics in patterned *Artemisia capillaris* plots. **Journal of Arid Land**, v. 6, n. 3, p. 352-360, 2014.

ZHANG, P.; CUI, Y.; ZHANG, Y.; JIA, J.; WANG, X.; ZHANG, X. Changes in Soil Physical and Chemical Properties following Surface Mining and Reclamation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 6, p. 1476-1485, 2016.

ZOBECK, T. M.; POPHAM, T. W. Modification of the wind erosion roughness index by rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 42, n. 1-2, p. 47-61, 1997.

ZOU, C. B.; CATERINA, G. L.; WILL, R. E.; STEBLER, E.; TURTON, D. Canopy interception for a tallgrass prairie under juniper encroachment. **PloS One**, v. 10, n. 11, p. e0141422, 2015.